

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Розглянуто результати дослідження напівпровідникових перетворювачів частоти для живлення електротехнологічних установок індукційного нагрівання металів. Представлено інформацію про перший український вантажопасажирський гібридний електромобіль з напівпровідниковим електроприводом.

Рассмотрены результаты исследования полупроводниковых преобразователей частоты для питания электротехнологических установок индукционного нагрева металлов. Представлена информация о первом украинском грузопассажирском гибридном электромобиле с полупроводниковым электроприводом.

1. Полупроводниковые преобразователи для питания установок высокочастотного индукционного нагрева

Высокочастотные полупроводниковые преобразователи электрической энергии широко используются в качестве источников питания технологических установок во многих областях производства. Наиболее динамично развиваются исследования, направленные на создание высокоэффективных источников питания для энергосберегающих электротехнологических установок (ЭТУ) индукционного нагрева металлов. Этот способ термообработки металлов является в современных технологиях одним из самых эффективных с точки зрения энергосбережения и экологии. Он может решить широкий круг задач электротермии, таких как горячее прессование, монтаж и демонтаж горячих посадок, закалка, отпуск, нормализация, предварительный нагрев под ковку, сварка деталей и плавка.

Одним из основных факторов энергоэффективности процесса индукционного нагрева является частота тока в индукторе ЭТУ. При различных видах термообработки, величине и конфигурации нагреваемых деталей оптимальными значениями частот тока могут быть частоты от 25 Гц до сотен килогерц. Исследования проводились в рамках программы «**Научно-технические основы решения проблем энергосбережения**» («**Энергосбережения**») «**Разработка энергосберегающих преобразователей электроэнергии для уменьшения потерь и повышения эффективности систем электроснабжения и использования электрической энергии**».

Работа целенаправленно проводилась в рамках создания высокочастотного источника питания ЭТУ индукционного нагрева по предложению и техническому заданию коммунального предприятия «Киевский метрополитен» – «Вагоноремонтный завод», где указан ряд деталей разной конфигурации, веса и объема, горячие посадки которых необходимо монтировать и демонтировать при ремонтно-восстановительных работах способом индукционного нагрева.

При такой технологии для получения максимального электрического и теплового КПД, а также требуемой динамики нагрева необходимо для каждой детали иметь свой индуктор. Была поставлена задача создать полупроводниковый преобразователь частоты, который без перестройки частоты управления мог бы эффективно работать с любым индуктором ЭТУ. Кроме того, в процессе нагрева стальных деталей с увеличением температуры значительно изменяются магнитная проницаемость и удельное электрическое сопротивление загрузки (нагреваемой детали), а значит, изменяются эквивалентное активное сопротивление цепи нагрузки и индуктивность индуктора, что приводит к изменению собственной частоты RLC -контура инвертора.

Из всех проанализированных схем полупроводниковых преобразователей частоты наиболее эффективной для создания источника питания ЭТУ индукционного нагрева являет-

ся схема резонансного тиристорного инвертора. Но по причине описанных выше двух факторов фиксированная частота управления здесь не может быть использована, поэтому был разработан тиристорный резонансный инвертор с адаптивным управлением [6].

При разработке инвертора и расчете параметров его элементов необходимо знать характеристики нагрузки – в нашем случае это система «индуктор – нагреваемая деталь». При этом напряжение на индукторе определяется величиной входного напряжения и добротностью RLC -контура инвертора, поскольку в данной схеме полезную мощность нагрузки можно рассматривать как мощность потерь колебательного контура инвертора.

Проведен комплексный анализ электротермических процессов, происходящих в системе «индуктор – загрузка» при высокочастотном индукционном нагреве.

В качестве объекта исследования был выбран технологический процесс демонтажа (снятия с вала) одного из основных ответственных узлов – внутренних колец опорных подшипников и лабиринтного кольца колесной пары вагона метрополитена. В среде MatLab и графическом модуле FemLab была построена реальная расчетная модель индукционного нагрева и поставлена необходимая технологическая задача – достичь заданной температуры ($160\text{ }^{\circ}\text{C}$) за время порядка 25 с.

При таком времени нагрева, которое было определено при предварительных экспериментальных исследованиях, имеет место незначительный нагрев вала из-за явления теплопроводности, что облегчает снятие кольца. С другой стороны, сталь опорного кольца теряет свои свойства при температуре выше $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, что вызывает необходимость обеспечения равномерного нагрева поверхности, не превышающего указанного уровня.

Поэтому в качестве основных задач исследования были приняты следующие факторы: оптимизация геометрии индуктора и выбор частоты питающего напряжения, сочетание которых обеспечивает необходимую динамику и равномерность нагрева деталей.

Исходя из этих условий, было проведено моделирование процесса индукционного нагрева на различных частотах тока в индукторе для нескольких вариантов конфигурации индукторов. Результаты моделирования позволили сделать выводы, что от величины частоты тока зависит температура, до которой нагревается деталь за заданный промежуток времени, а от расстояния между индуктором и нагрузкой зависит равномерность нагрева детали вдоль оси вала. Моделирование показало, что оптимальный процесс нагрева происходит при частоте тока в индукторе около 3250 Гц и расстоянии 1 мм, когда наблюдается максимальная допустимая динамика нагрева и имеет место равномерное распределение тепла в поверхностном слое деталей.

Для более полного определения характеристик нагрузки с целью получения исходных данных для расчета параметров силовых элементов инвертора проведено математическое моделирование электромагнитных процессов в системе «индуктор–загрузка» для рассматриваемого случая.

Затухание электромагнитной волны в металле связано с выделением тепловой энергии, т.е. нагревом металла, и зависит от частоты электромагнитных колебаний – f , Гц, а также от электрических свойств металла: удельного электрического сопротивления ρ , Ом·м, и относительной магнитной проницаемости μ [1]. Глубина проникновения электромагнитной волны в металл (в метрах) определяется выражением $\Delta = 503\sqrt{\rho/\mu f}$.

Расчеты показывают, что при индукционном нагреве в слое толщиной Δ выделяется $\approx 86\%$ активной энергии, а амплитуда потока энергии при этом уменьшается в $e^2 \approx 7,3$ раза. При рассмотрении системы «индуктор – загрузка» необходимо учитывать активные и реактивные мощности в нагрузке и индукторе, а также реактивную мощность, локализованную в зазоре между индуктором и нагрузкой.

Разработана методика расчета индукторов для нагрева цилиндрических поверхностей. Проведен расчет индуктора ЭТУ индукционного нагрева внутренних колец опорных подшипников ходовой части вагона метро с целью монтажа и демонтажа на горячей посадке. На оси возле каждого колеса на горячей посадке смонтировано два внутренних кольца опорных подшипников типа ДК-408 №32310 ГОСТ 8328 с натягом 0,001...0,042 мм.

Оптимальная температура нагрева составляет 140...160 °С, выше начинают происходить необратимые структурные изменения в стали, и она теряет свою первоначальную механическую прочность.

По разработанной методике для рассматриваемого случая определены активная и реактивная составляющие полной мощности системы «индуктор–загрузка», рассчитаны электрический КПД и коэффициент мощности. Расчеты показали, что для получения необходимой намагничивающей силы в индукторе должен протекать ток ≈ 310 А при количестве витков, равном 18. Из практики известно, что для таких величин тока и количества витков целесообразно применять водяное охлаждение, используя в качестве проводника медную трубку. Для изготовления индуктора использовалась медная трубка диаметром внешней окружности $D_1 = 8$ мм с толщиной стенки 1 мм. При таких размерах эквивалентное сечение меди составит 22 мм^2 .

При выборе проводника индуктора необходимо учитывать допустимую плотность тока. Так, при естественном охлаждении допустимые плотности тока в медном индукторе находятся в пределах $2...5 \text{ А/мм}^2$. Водяное охлаждение позволяет получить плотность тока выше 20 А/мм^2 , а при использовании трубок с толщиной стенки от 1 мм и выше плотность тока может составлять 40 А/мм^2 . При расчете плотности тока и сечения проводника индуктора необходимо также учитывать эффект вытеснения тока высокой частоты на поверхность.

В данном случае при частоте тока 3250 Гц эффективное сечение проводника составляет 35 %, т.е. $7,7 \text{ мм}^2$ при максимальной плотности тока 40 А/мм^2 , допустимый ток в индукторе будет 308 А и, если учитывать прерывистый характер процесса нагрева, то медная трубка диаметром 8 мм вполне обеспечит необходимый тепловой режим эксплуатации индуктора.

Разработанная силовая схема высокочастотного преобразователя включает в себя трехфазный неуправляемый выпрямитель, сглаживающий фильтр и однофазный мостовой тиристорный инвертор резонансного типа с адаптивным управлением. Для увеличения верхнего предела выходной частоты инвертора в цепи между тиристорами и обратными диодами каждого плеча включены коммутирующие дроссели, которые обеспечивают при выключении тиристорov необходимое обратное напряжение восстановления.

По результатам исследований характеристик нагрузки рассчитаны параметры ключевых элементов, конденсаторов и дросселей выпрямителя, сглаживающего фильтра и инвертора.

Проведено моделирование электромагнитных процессов в силовых цепях преобразователя в стандартных пакетах схемотехнических программ при работе инвертора в условиях изменения параметров RLC -контура, что имеет место при нагреве деталей в различных индукторах. В результате проведенных исследований скорректированы параметры силовых элементов преобразователя.

Разработана адаптивная система управления преобразователем. Под адаптивностью управления в данном случае следует понимать формирование импульсов управления инвертором в условиях, когда заранее не известны параметры нагрузки и их изменение в процессе нагрева. Причем, если структура преобразователя остается неизменной, а изменяются только параметры нагрузки, то такую систему можно назвать самонастраивающейся с параметрической адаптацией.

Для обеспечения оптимальных режимов электротермического процесса при высокочастотном нагреве (скорость нагрева, тепловой и электрический КПД) независимо от изменения параметров нагрузки необходимо вводить коррекцию выходных режимных параметров преобразователя ЭТУ с помощью соответствующего изменения параметров его силовой схемы и алгоритмов работы системы управления. Наиболее просто эти требования можно удовлетворить, используя принцип адаптивного управления последовательного резонансного инвертора. В отличие от традиционно управляемых инверторов, где управляющие импульсы формируются СУ, в адаптивно управляемых инверторах их получают, используя процесс обмена энергией между реактивными элементами инвертора и нагрузкой, чем обеспечивается надежная и устойчивая его работа в процессе нагрева.

В момент перехода тока в нагрузке через нулевое значение датчик тока формирует импульс для запуска цепи задержки на время, равное времени восстановления проводящих

тиристоров при выключении, после чего формируются управляющие импульсы на другую пару тиристоров мостового инвертора – они проводят вторую полуволну тока, после окончания которой процесс повторяется. Для запуска достаточно подать импульсы на любую пару тиристоров. Такой принцип управления позволяет максимально использовать частотные свойства тиристоров и тем самым повысить предельную частоту тока в индукторе ЭТУ. Кроме этого, достигается возможность регулировать величину мощности нагрузки путем изменения интервала времени между моментами перехода кривой тока в индукторе через нулевое значение и включением следующей пары тиристоров. Это дает возможность при необходимости стабилизировать ток, напряжение либо активную мощность нагрузки в процессе индукционного нагрева.

По своей структуре система управления двухканальная. Каждый канал содержит датчик тока, блок задержки, формирователь нормированных импульсов и усилитель импульсов, которые непосредственно идут на управляющие электроды тиристоров. Включение нагрева осуществляется нажатием кнопки «Пуск» путем подачи кратковременного импульса на соответствующую пару тиристоров.

Отключение происходит по сигналу таймера после прохождения заданного времени нагрева либо нажатием кнопки «Стоп». Эти сигналы блокируют импульсы управления любой из проводящих пар тиристоров.

В созданном экспериментальном образце высокочастотного преобразователя в целях унификации в качестве диодов выпрямителя и обратных диодов инвертора использованы диоды ДЧ 171-320, в качестве силовых тиристоров – ТБ 253-800-10. При этом были заведомо использованы вентили с завышенным допустимым током для проведения экспериментальных нагревов более габаритных деталей. По расчетам полная выходная мощность преобразователя составляет 800 кВА.

Проведенные экспериментальные исследования разработанного высокочастотного преобразователя в реальных условиях индукционного нагрева показали высокую динамику нагрева: нагрев колец опорных подшипников при оптимальной частоте тока 3,25 кГц до технологической температуры 160 °С происходил за 30 с.

Несмотря на то, что нагревы проводились на экспериментальных индукторах с явно не оптимальными параметрами (электрический и тепловой КПД), результаты исследований электромагнитных и тепловых процессов показали безусловную перспективность использования разработанного преобразователя в качестве источника питания ЭТУ высокочастотного индукционного нагрева с высоким энергосберегающим эффектом благодаря скорости и динамике нагрева.

Тиристорные преобразователи при всех своих положительных качествах имеют ограничение по выходной частоте на уровне 6...8 кГц. В некоторых видах электротермии для эффективного использования индукционного нагрева необходим источник питания ЭТУ с частотой выходного тока, превышающей эту частоту в несколько раз.

С внедрением силовой полупроводниковой электроники модулей четвертого поколения появились условия для расширения частотного диапазона и увеличения выходной мощности преобразователей с повышенной частотой. Современные полупроводниковые модули позволяют улучшить массогабаритные показатели, повысить предельные значения мощности и выходной частоты преобразователей, уменьшить потери преобразования, а база новых микросхем – создать надежные системы управления, повышающие энергетические и динамические характеристики.

В большинстве случаев преобразователи частоты разрабатываются для питания конкретных нагрузок; новая элементная база дает возможность создать преобразователи с частотой выходного тока 50...60 кГц и мощностью до 200 кВА практически для любых видов нагрузок.

Разработан и изготовлен экспериментальный макет высокочастотной ЭТУ для отделения слоя отработанной фрикционной пластмассы от чугунных тормозных башмаков колесных пар рельсового транспорта с целью дальнейшего их использования. Эта проблема ресурсосбережения решается разработанным инновационным технологическим способом,

который заключается в том, что в начале тормозной башмак охлаждают в сосуде с жидким азотом, затем помещают в индуктор и греют 1,5...2 мин до температуры 500 °С. За счет разницы температур и коэффициентов теплового расширения остатки отработанной фрикционной пластмассы отделяются от чугунного башмака. При этом чем больше скорость нагрева, тем эффективнее процесс отделения. Здесь нет ограничений по динамике и неоднородности нагрева.

При создании экспериментального макета высокочастотного преобразователя использованы силовые модули одной из ведущих фирм-изготовителей SEMIKRON [2]. Блок адаптивного интеллектуального модуля включает в себя транзисторный модуль, адаптивную плату, драйвер и составляет одно плечо инвертора. Модуль состоит из двух последовательно соединенных IGBT транзисторов и двух обратных диодов (рис. 1)

Согласно принятым на фирме-изготовителе SEMIKRON стандартам номинальным током модуля считается максимально допустимый постоянный ток коллектора транзистора при температуре корпуса модуля 25°С. По этому параметру и следует выбирать тип модуля, если известны выходная полная мощность или ток в индукторе.

Поскольку была поставлена задача создания высокочастотного преобразователя для широкого круга возможных нагрузок, остановились на модуле с наибольшим номинальным током – SEMIX 352 GB 128 D_S с адаптивной платой Board 2S SKYPER 32 и драйвером SKYPER 32. Этот блок имеет номинальный ток 370 А и рабочее напряжение 1200 В.

Технические характеристики силового преобразовательного устройства во многом определяются схемой управления. От параметров драйвера зависят динамические свойства силового каскада, уровень радиопомех, качество работы схемы защиты и мониторинга. Правильно рассчитанная и сконструированная схема управления обеспечивает функциональность и надежность силового преобразовательного устройства.

Драйверы интеллектуальных модулей SEMIKRON выполняют все функции, необходимые для безопасной работы модуля, производя постоянный мониторинг выходного тока, напряжения силовой шины питания и температуры модуля. Они имеют аналоговые выходы, сигналы на которых пропорциональны току, температуре модуля и напряжению силовой шины питания.

Встроенная схема формирования времени задержки переключения исключает одновременное открывание транзисторов полумоста и блокирует переключение полумоста на время, необходимое для исключения сквозного тока.

Кроме решения основных задач – управления затворами и формирования изолированных напряжений питания, SKYPER выполняет следующие функции:

- защиту от выхода транзистора из режима насыщения;
- подавление коротких импульсов;
- нормирование уровней и фронтов входных сигналов;
- формирование времени задержки переключения транзисторов полумоста (deadtime);
- защиту от падения напряжения питания СУ;
- запрет одновременного включения транзисторов полумоста;
- обработку и формирование сигнала неисправности.

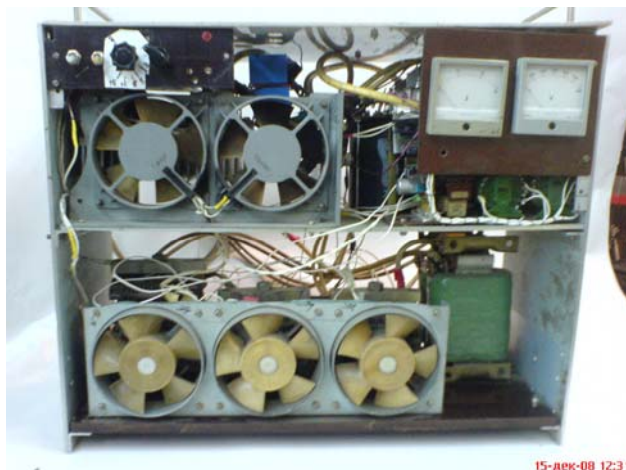


Рис. 1

Защита от перегрузки с помощью мониторинга напряжения насыщения является наиболее известным и распространенным способом защиты. Контроль напряжения насыщения позволяет выявить перегрузку по току, вызванную замыканием нагрузки, пробоем выхода на корпус или сквозным током при открывании (или пробое транзистора). Такой способ защиты является достаточно быстродействующим, не подверженным воздействию электромагнитных помех (как в случае индукционных датчиков тока), он не приводит к дополнительным потерям мощности, в отличие от схем защиты с использованием резистивных шунтов.

Разработанная система управления обеспечивает плавный запуск, формируя импульсы с частотой, большей, чем рабочая частота, которые через необходимое задаваемое время выводят инвертор на рабочий режим. Этот процесс осуществляется совместно с ШИМ-контроллером, выполненным на базе микросхемы TL 494, имеющим широкие функциональные возможности для построения систем управления полупроводниковых преобразователей частоты. В систему управления преобразователя входит блок защиты БЗ. В системе адаптивного интеллектуального силового модуля SEMIX - SKYPER формируется сигнал неисправности при выходе транзистора из насыщения, при понижении ниже критического напряжения питания системы управления и при перегреве полупроводниковой структуры транзистора. При появлении любого из этих факторов драйвер формирует сигнал аварии. Все эти сигналы и сигнал максимально допустимого (аварийного) тока от датчика, расположенного в «минусовой» цепи между конденсатором фильтра и транзисторами инвертора, обрабатываются логикой СУ и формируется сигнал блокировки ШИМ-контроллера. Проведены расчеты статических и динамических потерь в транзисторах и обратных диодах инвертора для определения тепловых характеристик и размеров охлаждающего радиатора. Максимально возможная полная мощность нагрузки может составить 350 кВА, при условии температуры кристалла 25 °С. С увеличением частоты коммутации увеличиваются потери, растет температура кристалла, соответственно снижается мощность нагрузки.

Проведена серия экспериментов по нагреву тормозного башмака с целью определения частоты тока в индукторе, при которой необходимая температура загрузки достигается за минимальное время. Минимальное время нагрева до температуры 500 °C составило 2 мин 15 с при частоте около 11 кГц.

Проведены испытания созданного экспериментального образца ЭТУ индукционного нагрева в лабораторных условиях при различных «загрузках», полученные результаты показывают высокую динамику нагрева, благодаря чему в несколько раз уменьшается время нагрева до необходимой технологической температуры и значительно уменьшаются затраты электрической энергии по сравнению с нагревом на промышленной частоте при прочих равных условиях.

Проведенные исследования разработанного источника питания в различных режимах работы позволяют сделать вывод, что он может быть базовой моделью для создания источников питания перспективных энергосберегающих высокочастотных электротехнологических установок.

2. Транзисторный преобразователь для привода постоянного тока гибридного грузопассажирского электромобиля

В продолжение проводимых работ по программе «**Развитие теории построения и разработка методов и способов повышения эффективности систем электроснабжения автономных объектов с источниками питания ограниченной мощности и энергоемкости**» (Параметр – 3) совместно с НТУУ «КПИ» и ИВЭ НАН Украины разработан экспериментальный гибридный электромобиль (экомобиль) на базе автомобиля-фургона «Соболь». Структурная схема силовой части электромобиля представлена на рис. 2 [4, 5], на котором приняты следующие обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; КП – коробка передач; ПП – полупроводниковый преобразователь; АБ – аккумуляторная батарея; ФБ – фотобатарея; ЭД – электродвигатель.

Параметры электропривода электромобиля следующие:	
Максимальная мощность электродвигателя, кВт	35
Номинальное напряжение, В.....	120
Номинальные обороты, об/мин.....	3600
Максимальный якорный ток, А.....	400
Номинальный ток обмотки возбуждения, А.....	8
Номинальный момент электродвигателя, кГм.....	12
Частота коммутации якорного тока, кГц.....	15
Индуктивность вспомогательного дросселя, мГн.....	1

Для управления скоростью вращения и моментом электродвигателя разработан и изготовлен комплект электрооборудования (рис. 3), основой которого является силовой транзисторный преобразователь с системой управления [3].

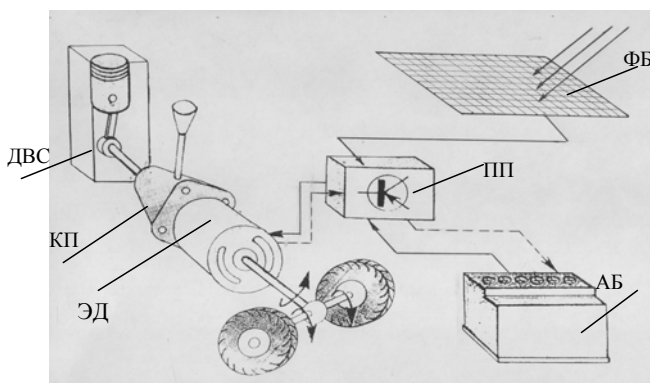


Рис. 2

Транзисторный преобразователь выполнен на двух модулях IGBT фирмы SEMIKRON – SEMIX 352 GB 128 D_S. Номинальный ток каждого модуля 370 А, напряжение 600 В. Параллельное соединение двух модулей в одном блоке дает возможность обеспечить надежную работу преобразователя с точки зрения токовой нагрузки. Внешний вид силового блока представлен на рис. 4. Охлаждение блока естественное, радиатор используется как конструктивный элемент для

размещения двух силовых модулей ключевого элемента обмотки возбуждения, реверсника, драйверов, блока входных конденсаторов, вспомогательных источников питания, разъемов, датчика тока, расположенного на выходных шинах и т.п.

Проведены экспериментальные исследования электромагнитных процессов в силовом блоке и в цепи обмотки возбуждения, предварительные стендовые испытания.

Разработанная система управления кроме функций, обеспечивающих работоспособность силового блока (указанных в предыдущем параграфе), осуществляет управление гибридной системой энергообеспечения электромобиля, благодаря чему осуществляется функционирование электромобиля в следующем порядке. При движении в гибридном варианте – ДВС выключен, коробка передач устанавливается в нейтральное положение, при этом тяговый электродвигатель механически отсоединяется от ДВС. Тяговый электродвигатель начинает разгон машины с помощью полупроводникового преобразователя, получая питание от



Рис. 3

аккумуляторной батареи. При достижении соответствующей скорости электромобиля включается коробка передач, двигатель внутреннего сгорания через муфту сцепления и коробку передач соединяется с тяговым электродвигателем и через дифференциал с ведущими колесами. Таким образом, происходит вращение коленчатого вала ДВС и последний приводится в рабочее состояние. Дальнейшее движение машины осуществляется от двигателя внутреннего сгорания, а тяговый электродвигатель переводится с помощью преобразователя в генераторный режим и заряжает аккумуляторную батарею.

При движении в режиме «чистого» электромобиля коробка передач постоянно включена

в нейтральное положение, двигатель внутреннего сгорания выключен, тяговый электродвигатель получает питание от аккумуляторной батареи, а его скорость и момент на валу регулируются полупроводниковым преобразователем.

При необходимости (в сложных режимах движения) возможна совместная работа двигателя внутреннего сгорания и тягового электродвигателя, при этом последний питается от аккумуляторной батареи через преобразователь, а коробка передач постоянно включена на ту или другую ступень.

Таким образом, при сравнении с общепринятой тенденцией создания гибридных электромобилей предложенная структура позволяет осуществить различные режимы функционирования гибридного электромобиля с меньшими затратами энергии. В то же время имеется возможность использования в качестве базового любого автомобиля с задним приводом, что позволяет путем несложной доработки и установки тягового электрооборудования создать полнофункциональный гибридный электромобиль со значительно меньшими временными и финансовыми затратами по сравнению с разработкой и изготовлением специального ДВС, тягового электродвигателя, встроенного в ДВС и специальной экипажной части. При этом, если необходимо использовать тяговый электродвигатель с односторонним выходом вала, передача вращающего момента на дифференциал может осуществляться с помощью ременной (цепной или редукторной) передачи, а шкив устанавливается на место тягового электродвигателя. Всё перечисленное выше позволяет получить новый технический результат – повысить КПД работы гибридного электромобиля во всех режимах движения, так как отсоединение тягового электродвигателя от ДВС с помощью нейтрального положения коробки передач дает возможность снизить сопротивление вращению электродвигателя, что значительно повышает межзарядный пробег и эффективность использования электромобиля.

Необходимо также отметить, что возможность установки на ГЭМ (Соболь-Э, рис. 5) аккумуляторной батареи большой емкости (12 кВт·ч) позволяет значительно расширить его функциональные возможности по сравнению с существующими гибридами, имеющими на борту АБ 1-2 кВт·ч.

Положительной стороной проекта можно отметить также наличие дизельного ДВС, позволяющего использовать биотопливо. Такое сочетание в ГЭМ применяется впервые и дает



Рис. 4

еще возможность повысить экологичность разработанного транспортного средства.

Фотобатарея, установленная на крыше ГЭМ, позволяет получать дополнительную энергию на протяжении всего цикла движения и стоянки машины, что также повышает ее межзарядный пробег в процессе эксплуатации в режиме «чистого» электромобиля (рис. 5).

Функционирование всех систем ГЭМ обеспечивают силовой полупроводниковый преобразователь, выполненный на модулях IGBT фирмы Semikron, микропроцессорная система управления, блок мониторинга состояния аккумуляторной батареи, блок ин-



Рис. 5

дикации состояния привода, зарядное устройство от сети ~ 220 В.

В заключение следует отметить, что применение предложенной структуры ГЭМ совместно с использованием биотоплива и дополнительной солнечной энергии значительно повышает эффективность использования экологически чистого транспорта и позволяет на этой основе создавать с минимальными затратами транспортные средства для эксплуатации в различных сферах народного хозяйства.

В настоящее время грузопассажирский гибридный электромобиль проходит дорожно-лабораторные испытания.

1. *Кувалдин А.Б.* Низкотемпературный индукционный нагрев стали. – М.: Энергия, 1976. – 109 с.
2. *Павлов В.Б., Попов А.В., Павленко В.Е.* Высокочастотный полупроводниковый источник питания электротехнологических установок // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2008. – Вип. 20. – С. 48–49.
3. *Шидловский А.К., Згуровский М.З., Яндульский А.С., Павлов В.Б., Попов А.В., Кудря С.А., Головкин В.М.* Первый украинский грузопассажирский гибридный электромобиль // Техн. электродинамика. Темат. вип. “Силовая электроника та енергоефективність”. – 2008. – Ч. 4. – С. 65–67.
4. *Шидловський А.К., Павлов В.Б., Юрченко О.М.* Перший український гібридний електромобіль // Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Силовая электроника та енергоефективність”. – 2003. – Ч. 3. – С. 25–26.
5. *Шидловский А.К., Павлов В.Б., Юрченко О.М., Попов А.В., Павленко В.Е.* Полупроводниковые преобразователи электротранспортных средств специального назначения // Техн. электродинамика. – Темат. вип. “Силовая электроника та енергоефективність”. – 2004. – Ч. 2. – С. 24–25
6. *Ядыкин И.Б., Шумский В.М., Овсянян Ф.А.* Адаптивное управление непрерывными технологическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.