

Многофункциональная микропроцессорная система управления транскутером

Александр Семёнов, Владислав Цветков, Александр Элизов

В статье приводится описание системы управления транскутером семейства «Кенгуру» — наземным транспортным средством для людей с ограниченными физическими возможностями. Особенности описываемой системы управления обусловлены многофункциональностью и трансформируемостью транскутера. Показаны преимущества аппаратной реализации на базе бортового компьютера РСМ-3350 формата РС/104.

ТРАНСКУТЕР — КАЧЕСТВЕННО НОВЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОДУКТ

Транскутеры — новая разновидность трансформируемых многофункциональных наземных транспортных средств индивидуального пользования с электроприводом, преимущественно предназначенных для лиц с ограниченными физическими возможностями. Они возникли в результате одновременного развития нескольких достаточно самостоятельных направлений транспортного машиностроения: реабилитационной транспортной техники — инвалидных кресел-колясок второго поколения и некоторых медицинских аппаратов (электроприводных), малоразмерных скоростных дорожных транспортных средств — скутеров (электроскутеров), робототехники — самоходных роботов и космической транспортной техники — планетоходов, а также мехатроники и, разумеется, электроники. Точнее, как обычно и бывает, — на стыке этих направлений.

«Катализатором» такого прогресса в отдельно взятом сегменте транспортной техники стали развернутые в последнее десятилетие НИОКР по решению двух важных проблем: обеспечения проходимости транспортного средства по лестничным маршам и реализации принципа многофункциональности (а значит, и трансформируемости в широком диапазоне).

«Стартовав» примерно одновременно и двигаясь каждый своим путём,

мировыми лидерами в новом качественном прорыве стали изобретатель-миллионер Диан Кэймен со своими сотрудниками (США) и группа специалистов с кафедры колёсных и гусеничных машин (лаборатория электродвижения) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (Россия).

Основная удачно реализованная идея американских коллег — «откровенная» одноплоскостная продольная гиристабилизация транспортного средства в основном (главном) из трёх возможных режимов-опций, а именно — с балансированием на двух точках опоры. Российские специалисты пошли по пути сохранения минимум трёх точек опоры в основных (главных) режимах-опциях, уверенного движения по лестницам и многофункциональности (до 8-12 функций) с ярко выраженными трансформациями; при этом как дополнительное свойство реализована двухплоскостная (продольная и поперечная) гиристабилизация. «Русский» путь определил и большие возможности, в частности, жизнеспособность конструкций применительно к медицинским аппаратам (в отличие от ос-

новного изделия Д. Кэймена — аппарата Independence 3000 IBOT Transporter).

За десять лет интенсивной работы лабораторией электродвижения создано на уровне проектов, изобретений, полномасштабных ходовых макетов и образцов несколько десятков конструктивных вариантов электроприводных шасси с колёсными формулами 4×4, 2×2 и 4×3. Основные задачи — «лестничная проходимость» и многофункциональность — в основном решены, лучшие изделия сертифицированы, готовится серийное производство транскутеров на мировом техническом и дизайнерском уровнях.

Наиболее удачными на сегодняшний день транскутерами являются машины семейства «Кенгуру» (рис. 1), названного так за некоторое внешнее и



Рис. 1. Внешний вид одного из образцов транскутера семейства «Кенгуру»

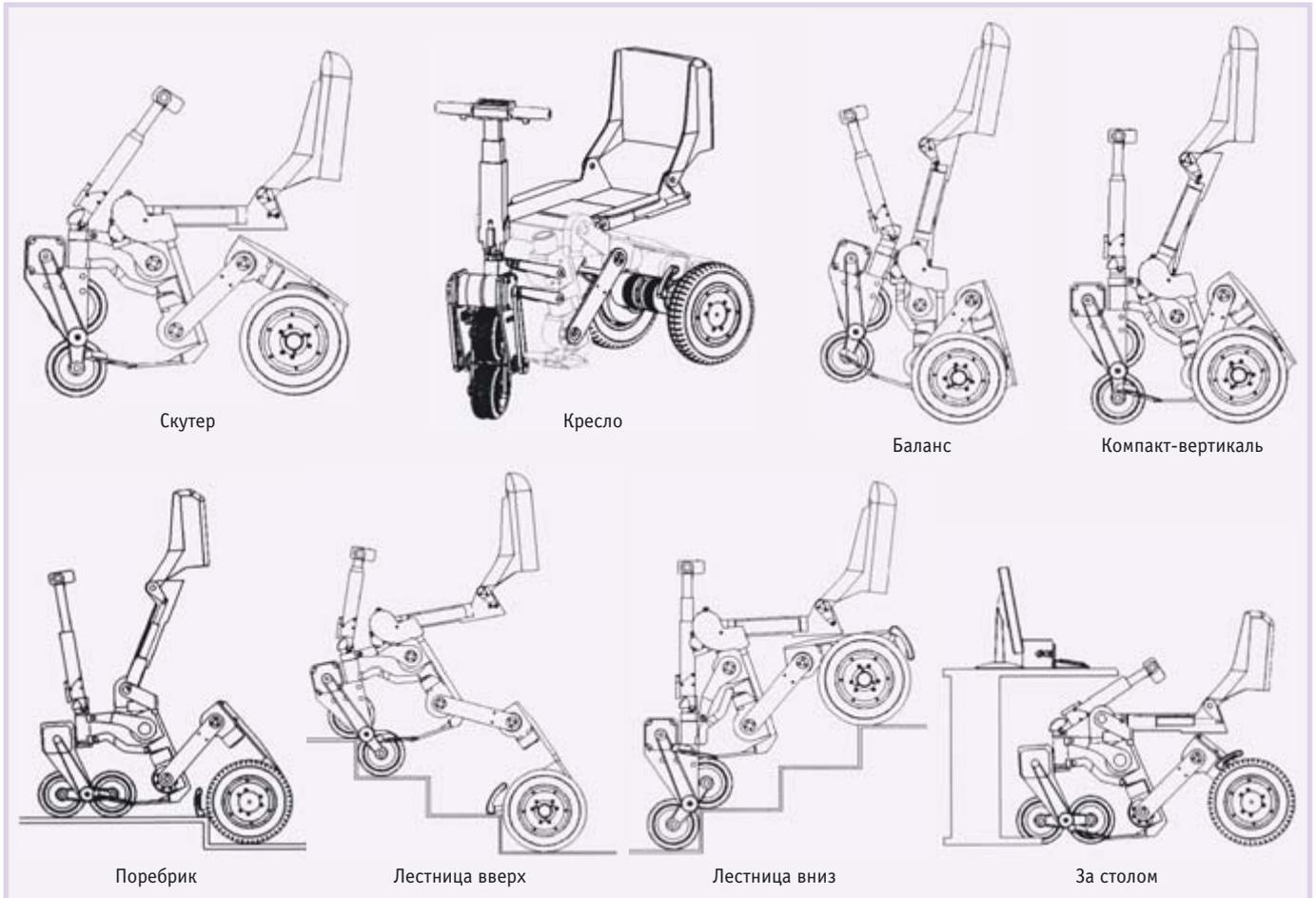


Рис. 2. Основные конфигурации транскутера на примере одного из вариантов его исполнения

где-то функциональное сходство с популярным животным-прототипом, особенно в режиме гиросtabilизации с опорой на два задних колеса.

В числе функций (и, соответственно, конфигураций) транскутеров семейства «Кенгуру» необходимо назвать следующие (рис. 2):

- «Скутер» – движение с большой скоростью на длинной базе;
- «Кресло» – маневрирование на короткой базе;
- «Баланс» – движение стоя в режиме гиросtabilизации на двух колесах;
- «Компакт-вертикаль» – движение стоя на трёх колесах в режиме гиросtabilизации;
- «Поребрик» – преодоление поребрика сходу стоя или сидя (отдельные модели имеют дополнительную функцию «Косой поребрик» – преодоление поребрика под углом до 8 градусов);
- «Лестница вверх» – подъём по ступеням лестницы передним ходом, сидя или стоя;
- «Лестница вниз» – спуск по ступеням лестницы передним ходом, сидя;
- «За столом» – низкая посадка, ноги на полу.

Вот почему в составе транскутера в среднем 10 компактных электроприводов (в последних разработках используются электроприводы новой особо высокомоментной серии собственной разработки!) с микропроцессорным управлением.

Естественно, для таких аппаратов должна была быть разработана и непростая система управления (СУ). Сейчас это многофункциональная микропроцессорная СУ с бортовым компьютером и самой современной элементной базой.

Теперь, собственно, можно перейти к основному содержанию статьи – к устройству и функционированию СУ.

УСТРОЙСТВО И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСКУТЕРОМ

Бортовой компьютер – «мозг» транскутера, который управляет периферийными контроллерами, поддерживает с ними обмен данными по общей шине с CAN-интерфейсом. «Мозг» должен обладать соответствующим быстродействием и производительной мощностью, поскольку у

него более десятка «подчинённых». Помимо управления электроприводами нужно ещё принимать команды от рулевой головки, которую обслуживает свой контроллер, обчислять и выводить на индикацию остаточный заряд аккумуляторной батареи, решать траекторную задачу для передвижения по лестнице, обладать возможностью удалённого доступа и при всём этом иметь минимальные габариты и приемлемую стоимость. Таким требованиям наиболее полно отвечают промышленные компьютеры формата PC/104. Компьютеры именно этого формата широко используются для управления различными системами космических кораблей многоразового использования, устанавливаются на борту современных спутников и истребителей.

На транскутере применяется выполненный в формате PC/104 бортовой компьютер РСМ-3350 фирмы Advantech.

Посредством бортового компьютера реализуются следующие отдельные программы:

- разгона и торможения скутера с управляемым ускорением/замедле-

нием, которое персонально адаптируется для пользователя;

- «Электродифференциал заднего моста» (программа, реализующая алгоритм работы задних колёс при поворотах);
- продольной и поперечной гиросtabilизации;
- преодоления поребрика вверх и вниз;
- движения по лестнице вверх и вниз, адаптации к размерам ступенек;
- идентификации параметров лестницы;
- изменения колесной базы (от 450 до 850 мм);
- мониторинга датчиков скутера, блоков управления приводами, аккумуляторной батареи;
- эмуляции на основе показаний датчиков работы парковочного радара;
- удалённого доступа к управляющим программам, изменения параметров настройки через Интернет.

Транскутер имеет в своём составе 54 датчика, позволяющих ему приспособиться к окружающей среде. Среди них:

- датчики Холла, встроенные в вентильные электродвигатели машинок, позволяющие управлять этими двигателями в различных режимах;
- абсолютные датчики угла, определяющие положение составных частей транскутера;
- резистивный датчик поворота руля;
- инфракрасный датчик расстояния для парковочного радара;
- инклинометр, позволяющий определять наклон скутера при движении;
- акселерометр и датчик угловой скорости, служащие для управления гиросtabilизацией;
- радиочастотный приёмник для дистанционного управления;
- резистивный датчик линейного перемещения для определения положения кресла относительно рамы;
- шунты для измерения тока двигателей и остаточной ёмкости аккумулятора;
- потенциометрический датчик скорости движения;
- тензометрический датчик веса для контроля развесовки аппарата (возможный вариант).

Общее число контроллеров нижнего уровня, отвечающих за работу отдельных блоков, — 13: десять контроллеров управления приводами; микромощный контроллер рулевой головки, минимизирующий количество связей между панелью управления и «мозгом» и от-

вечающий за индикацию выводимой информации на дисплей; контроллер определения остаточной ёмкости аккумуляторной батареи; контроллер заряда и разряда аккумуляторной батареи.

Все контроллеры нижнего уровня связаны между собой и «мозгом» по общей шине с CAN-интерфейсом, что позволяет минимизировать количество проводников и достичь реальной скорости передачи данных 1 Мбит/с. Программный цикл и количество устройств в сети позволяют производить обмен посылками с частотой 200 Гц.

Электронная часть и программное обеспечение транскутера модифицировались и развивались на протяжении всего времени проектирования и отладки основной конструкции аппарата. Прежде всего появлялся опыт эксплуатации, который выявлял недостатки тех или иных технических решений и позволял наметить пути последующей модернизации. Кроме этого, неоднократно изменялась конструкция аппарата, что требовало определённой унификации блоков и систем для их переноса на вновь создаваемую модель. Говоря о некоторых этапных решениях, которые повлияли на архитектуру системы управления и состав её электронной части, можно выделить два основных варианта построения системы.

Первый вариант решения системы управления принципиально отличался от последующих. В его основу была заложена распределённая система, включающая в себя центральный и периферийные контроллеры, соединённые «звездой». Обмен данными между контроллерами происходил по интерфейсу RS-232. Функции центрального контроллера выполнял восьмиразрядный процессор AT89C2051 с тактом 1 мкс; периферийные контроллеры распределялись по частям аппарата, и каждый обслуживал только свою «область»: кресло, колесо, «хвост» и т.д. Такое решение, когда задача дробилась на части, было продиктовано относительно малой производительностью центрального процессорного устройства (ЦПУ) AT89C2051 и его незначительным быстродействием. Применение интерфейса RS-232 подразумевает обмен данными только между двумя устройствами одновременно, то есть количество соединительных проводов пропорционально числу обсуживаемых контроллеров, что плохо соответствовало условиям плотной компоновки устройств. Последующие версии данного варианта

построения системы управления предусматривали увеличение количества периферийных контроллеров и запараллеливание нескольких центральных контроллеров для роста производительности ЦПУ, выполненного на базе той же серии 51.

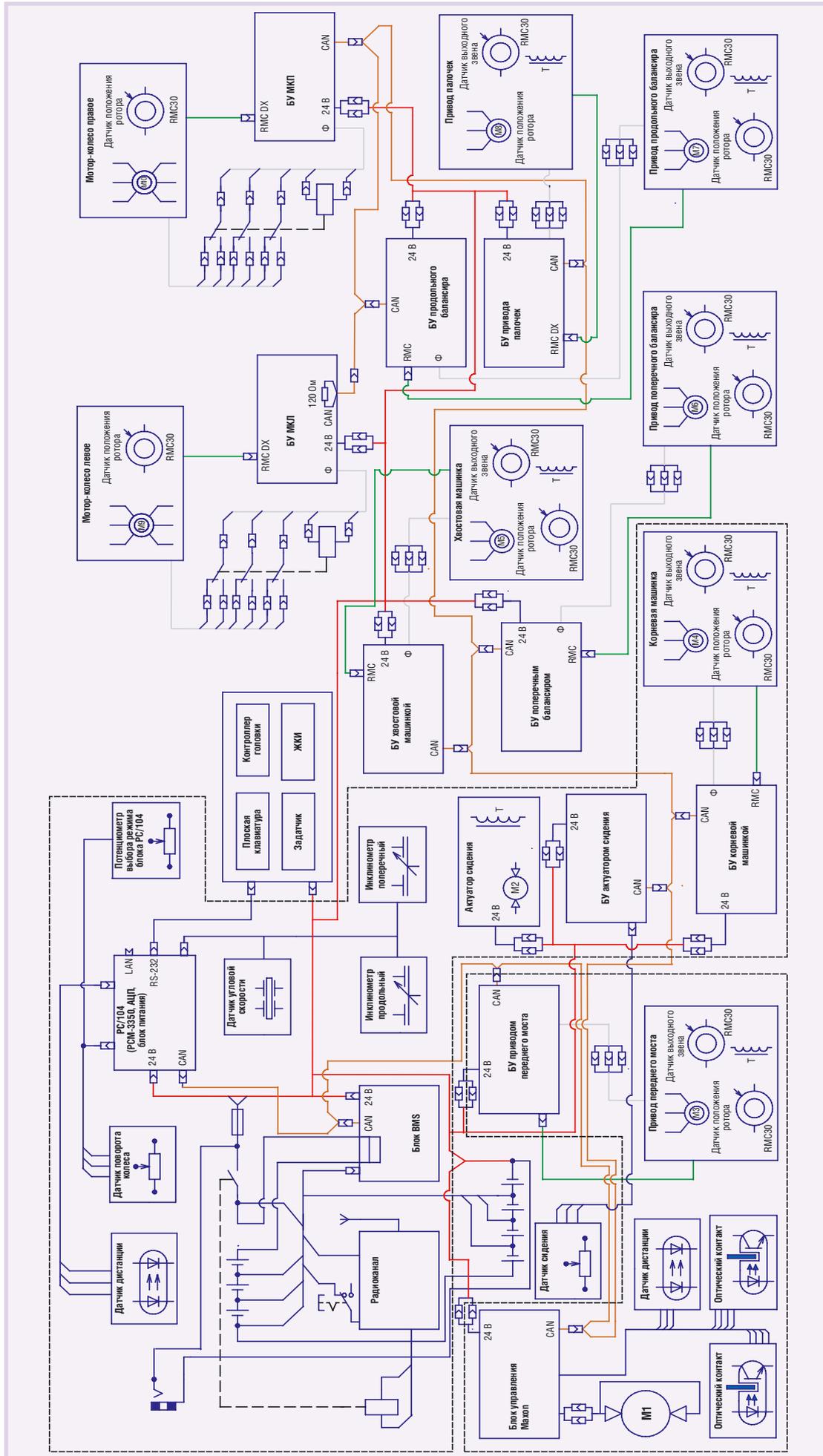
Следующий вариант построения системы управления основывался на применении CAN-сети реального времени с общей средой передачи данных. Это означает, что все узлы сети одновременно принимают сигналы, передаваемые по шине, а CAN-контроллеры предоставляют аппаратную возможность фильтрации CAN-сообщений. Каждый узел состоит из двух составляющих: собственно CAN-контроллера, который обеспечивает взаимодействие с сетью и реализует протокол обмена, и микропроцессора. Максимальная скорость передачи данных по CAN-сети составляет 1 Мбит/с при длине кабеля не более 40 м, что на порядок выше, чем в сети RS-232.

Общая блок-схема СУ представлена на рис. 3.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСКУТЕРОМ

Архитектура системы была выбрана двухуровневой.

Нижний уровень — обслуживание непосредственно самого привода, верхний уровень — согласованная работа приводов по заданной программе (алгоритму), тестирование и контроль работы системы и датчиков; внешний интерфейс — удалённый доступ. В качестве контроллера верхнего уровня был выбран 16-разрядный микроконтроллер SAB80C167 фирмы Siemens с тактом 10 нс, что обеспечило увеличение производительности ЦПУ более чем на 2 порядка по сравнению с AT89C2051. В качестве контроллера нижнего уровня был выбран специализированный микроконтроллер TMS320F2406 фирмы Texas Instruments для управления электродвигателями. Поскольку все приводы на аппарате однотипные (вентильные двигатели постоянного тока, управляемые по сигналам с датчиков Холла), было принято решение унифицировать блоки управления для простоты их тиражирования, отладки и ремонта. При необходимости блок вентильного двигателя мог также применяться для управления коллекторным двигателем. Каждый блок состоял из силовой платы, процессорной платы, платы сопряжения



Условные обозначения:
 — линии связи блоков управления с датчиками исполнительных приводов (RMS — абсолютные датчики угла, DX — датчики Холла);
 — CAN-интерфейс; — провод фазы (Ф); — шина питания; БУ — блок управления; ЖКИ — жидкокристаллический индикатор; МКЛ — мотор-колесо левое; МКП — мотор-колесо правое;
 BMS — система управления питанием; LAN — порт для внешнего подключения бортового компьютера с целью программирования, настройки и т.п.; Т — тормоз электромагнитный.

Рис. 3. Блок-схема СУ транссканером семейства «Кенгуру»

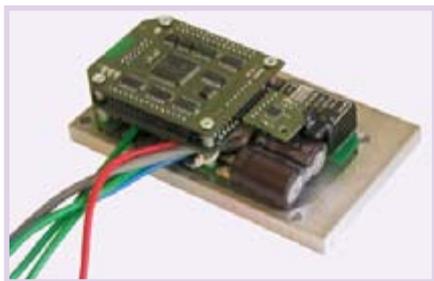


Рис. 4. Действующий макет блока управления двигателями (общий вид со снятой крышкой)

(рис. 4). На плате сопряжения располагался контроллер AT90S8535 для обслуживания датчиков.

Основной задачей было создание блока, пригодного для управления вентиляемыми двигателями различной мощности, с программным обеспечением для организации обратной связи двигателя по скорости, моменту или положению. В течение года была разработана и испытана первая версия блока управления с выходным током до 40 А. Надёжность первой версии блока была низка из-за ряда конструктивных недоработок. Вторичная цепь питания блоков была построена на импульсных источниках, драйверы которых при пульсациях входного напряжения выходили из строя, создавая тем самым условия для пробоа по питанию микросхем соответствующих цепей.

Вторая версия блоков отличалась от первой применением DC/DC-конвертеров вторичного питания и однофазной схемой выходных ключей. По сути, вторая версия устранила только один недостаток в цепи питания; конструктивно и идеологически первые две версии не отличались.

Третья версия блоков кардинально отличается от первых двух. Была поставлена задача при минимальных габаритных размерах (внутренний объём блока под электронику составляет $104 \times 52 \times 23$ мм = 0,124 л) получить максимальную мощность, для чего пришлось заново разрабатывать блок. Минимизация габаритов блока определялась прежде всего компоновочными соображениями. Отказались от платы сопряжения. Роль обслуживания внешних устройств переложили на контроллер TMS320F2406, который раньше обслуживал только двигатель, и отказались от AT90S8535. Оптически развязали CAN, что повысило помехоустойчивость в линии передачи данных. Переделали канал отсечки по току, в результате чего более эффективной стала защита по то-

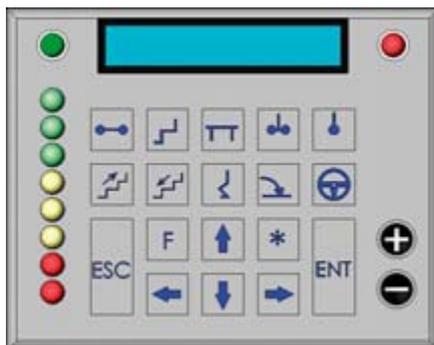


Рис. 5. Схема компоновки одного из ранних вариантов рулевой головки (пульта управления) транскютера

ку. Ввели плату флэш-памяти, что позволило менять прошивку блока без его замены. Доработали программное обеспечение для управления двигателем по напряжению. Все эти мероприятия позволили уменьшить внешний габарит блока, улучшить защиту, повысить качество управления. Блок гарантированно работает при мощностях до 1 кВт при обеспечении необходимого теплоотвода. Слабым местом блока является его соединение с приводом и внешними устройствами. Исходя из компоновочных соображений, пришлось отказаться от использования соединительного разъёма; фазные провода подпаиваются прямо на силовую плату, что затрудняет монтаж, снижает надёжность и усложняет ремонт. Однако это оправданно, пока не определён окончательный вид и компоновка аппарата. На данном этапе дальнейшее совершенствование блока управления решается путём применения модульных силовых мостов выходных транзисторов GWM 160-0055P3 фирмы IXYS,



Рис. 6. Современный вариант рулевой головки (пульта управления) транскютера семейства «Кенгуру»

что улучшает тепловые и токовые эксплуатационные характеристики. Также разработан и испытан блок векторного управления вентиляемыми двигателями с применением 10-разрядного датчика положения ротора RMB30 фирмы RLS взамен датчиков Холла. Этот блок позволяет поднять управление на качественно новый уровень, уменьшает пульсации выходного тока, снижает порог ограничения регулируемой скорости, повышает КПД, снижает уровень шума. Применение данного блока требует доработки конструкции привода. Сигнальный вариант блока представляет собой одноплатную конструкцию с габаритами $110 \times 90 \times 30$ мм, окончательный вариант будет определён конструкцией аппарата.

Модернизации также подверглась рулевая головка (рис. 5, 6). Теперь это конструктивно законченный блок с улучшенным внешним видом (рис. 6), с плоской клавиатурной панелью, графическим ЖК-дисплеем. Блок построен на базе микроконтроллера MSP430F149 фирмы Texas Instruments, который занимается обработкой графической информации, выводимой на дисплей. При необходимости рулевая головка может обеспечить беспроводную передачу данных по каналу IrDA. Информация для индикации передаётся от контроллера верхнего уровня по RS-232.

Применение в качестве контроллера верхнего уровня микропроцессора SAB80C167 накладывало ряд ограничений по мощности и быстродействию и, как следствие, увеличивало время отклика, что внешне проявлялось в очевидном запаздывании при выполнении

некоторых команд. Поэтому было принято решение установить на аппарат бортовой компьютер формата PC/104, что позволило существенно расширить возможности при проектировании и отладке, а также увеличить набор пользовательских функций.

О ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ

Разработка программного обеспечения для системы автоматического управления, функционирующей в режиме реального времени, проводилась с помощью программного пакета MatLab фирмы Math Works с использованием интегрированной визуальной среды разработки Simulink. Использование библиотеки Simulink, имеющей в своем составе сотни готовых блоков различного назначения, значительно сокращает процесс программирования и сводит его лишь к соединению этих блоков между собой. При отсутствии необходимого блока его можно разработать самостоятельно на одном из нескольких языков программирования. Составленную в Simulink модель можно проверить на реальном оборудовании, применив Real-Time Workshop, который преобразует её в код на языке C для различных аппаратных платформ. В качестве такой платформы можно использовать IBM PC совместимый компьютер, на который устанавливается ядро реального времени xPC Target. Ядро xPC Target позволяет загружать, исполнять модель и изменять в процессе исполнения параметры блоков, из которых состоит модель. При использовании пакета MatLab также значительно упрощается обработка параметров движения многозвенных аппаратов, каковыми являются трансскутеры семейства «Кенгуру».

Первоначально в качестве бортового компьютера формата PC/104 была выбрана плата SMK6486DX100HR-16 фирмы Real Time Devices USA. Данная плата применялась совместно с сетевым адаптером CM202ER. Были выполнены следующие основные этапы модификации контроллера верхнего уровня:

- смоделированы и прописаны под MatLab блоки управления нижнего уровня для всех машинок (то есть приводов) трансскутеров «Кенгуру»;
- созданы описания внешних функций (связей) всех применяемых на транскутере датчиков и устройств для связи с MatLab, прописаны обработки первичных сигналов датчиков,

написаны драйверы связи входных сигналов датчиков с программой обработки;

- создана библиотека основных режимов и конфигураций трансскутеров, отработаны связи между блоками внутри каждого из основных режимов;
- написаны подпрограммы переходов между основными режимами с учётом алгоритма перестроения и сигналов обратных связей с датчиков устройств;
- созданы подпрограммы обработки для датчиков и устройств, обеспечивающие контроль перестроения, движения и работы транскутера и блоков.

В настоящее время ведётся отработка управляющей программы, включающей в себя все перечисленные блоки и подпрограммы, апробируются различные модели связей между элементами и звеньями транскутера.

В ходе отладки программного обеспечения процессорная плата SMK6486DX100HR-16 показала себя с наилучшей стороны и полностью оправдала своё применение в качестве макета. Однако за время проектирования появились контроллеры, более интересные по ряду показателей: цена, габариты, быстродействие, дополнительные функции и коммутационные возможности. Примером такого контроллера является процессорный модуль PCM-3350 фирмы Advantech. Применение данного модуля позволяет сократить время готовности аппарата к работе, по сравнению с SMK6486DX100HR-16, в 3-3,5 раза. Самотестирование и загрузка программы для SMK6486DX100HR-16 занимает порядка минуты, для PCM-3350 это время составляет 15-20 с. Быстродействие выше в 3 раза; сетевой адаптер расположен на плате контроллера, что позволяет обойтись двухплатной (плата PCM-3350 + плата CAN и АЦП) конструкцией блока PC/104 вместо трёхплатной. Цена в 3 раза меньше. В силу перечисленных аргументов в пользу процессорного модуля PCM-3350 именно это изделие сейчас используется в качестве бортового компьютера транскутера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье идеи и представленные реальные достижения не только теоретически обоснованы разработчиками с использованием совре-



Рис. 7. Один из опытных образцов (ходовых макетов) транскутера

менных компьютерных технологий, но и проверены на многочисленных оперативно изготавливаемых ими ходовых макетах и экспериментальных образцах (рис. 7).

Разработки экспонировались на выставках регионального, всероссийского и международного уровней. В порядке подготовки серийного производства транскутеров на мировом техническом и дизайнерском уровнях, в частности, изготовлен и в октябре 2005 года продемонстрирован на ежегодной Всемирной выставке RENACARE® International в г. Дюссельдорфе (Германия) прототип аппарата «Кенгуру 3×3» с описанной СУ. Прототип (единственный из восьми российских экспонатов!) удостоен Сертификата организаторов выставки и исследовательского института Forschungsinstitut Technologie-Behindertenhilfe, специализирующегося на технологиях помощи инвалидам. Данный Сертификат подтверждает инновационный характер самой идеи и её технической реализации.

Наряду с отладкой электромеханики совершенствуется и оптимизируется СУ и программное обеспечение к ней. Человечество уверенно переходит на новый уровень техники в области малоразмерного электроприводного индивидуального транспорта, закладывает новый «кирпичик» в реабилитационную индустрию и в технологию автоматизации! ●

**Авторы — сотрудники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета
Телефон: (812) 534-4905, 702-7048
Факс: (812) 702-7043**