

Разработка общих алгоритмов работы блока управления магистральным тягачом с комбинированной энергоустановкой

к.т.н. Нагайцев М.В.
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»
8 (499) 154-13-01 admin@nami.ru

Аннотация. В статье изложены принципы построения и реализация алгоритмов управления комбинированной энергоустановкой (КЭУ) магистрального автопоезда. Дан алгоритм управления автоматической коробкой передач в составе КЭУ. Предложена модель блока управления автомобилем с КЭУ, реализованная в MATLAB/Simulink.

Ключевые слова: комбинированная энергоустановка, магистральный автопоезд, алгоритмы управления, модель блока управления.

Введение

Блок управления автомобилем, или VCU (от англ. Vehicle Control Unit), является одним из основных элементов системы управления автомобилем с комбинированной энергоустановкой (КЭУ). В функции блока управления автомобилем входит задание уставок по крутящему моменту для двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электромашин, выбор передачи в коробке передач, управление сцеплением, запуск и остановка двигателя, а также контроль состояния электрических накопителей энергии и других компонентов КЭУ. Для того чтобы блок управления автомобилем мог выполнять возложенные на него функции, необходимо разработать и оптимизировать алгоритмы его работы. Проверка правильности алгоритмов, их доработка и оптимизация осуществляется в модели блока управления, испытываемой в составе математической модели движения автомобиля с КЭУ.

Традиционно областью применения автомобилей с КЭУ рассматривалась городская среда, где в большей мере реализуется рекуперация кинетической энергии автомобиля. В данной статье приведено описание разработанных алгоритмов управления КЭУ полноприводного магистрального тягача с учетом рекуперации потенциальной энергии при переменном продольном профиле дороги, а также модели блока управления автомобилем, созданные в MATLAB/Simulink.

Разработка требований к блоку управления автомобилем

Основной задачей при управлении КЭУ является обеспечение адекватной реакции на «запросы» водителя, которые формируются путем воздействия на органы управления: руль, педали, переключатели режимов работы отдельных систем. При решении задачи управления КЭУ можно ограничиться следующими органами управления:

- педаль управления ДВС;
- педаль тормоза;
- переключатель выбора режима работы (КЭУ).

При разработке алгоритмов управления агрегатами автомобиля необходимо иметь информацию о состоянии объекта в целом и его подсистем:

- скорости движения автомобиля;
- частот вращения ДВС и электромашин;
- степени разряда электрических накопителей энергии (далее – батареи).

Перечисленные входные параметры должны полностью определять управляющие сигналы для компонентов КЭУ. При этом необходимо обеспечивать выполнение следующих условий:

- отрабатывать задания водителя с высокой точностью и быстродействием;
- не допускать формирование таких значений управляющих сигналов, которые способны повредить ту или иную составную часть КЭУ;
- обеспечивать эффективность работы КЭУ как в отношении расхода топлива, так и в отношении степени заряда батареи;

- минимизировать количество действий при управлении КЭУ, а также максимально сглаживать различные негативные явления, возникающие при переходных процессах работы.

Разработка алгоритмов управления

На рисунке 1 представлен один из возможных вариантов КЭУ, в которой используются три электромшины, одна из которых работает параллельно традиционному механическому приводу от ДВС на заднюю тележку тягача, а две другие обеспечивают индивидуальный привод колес передней оси.

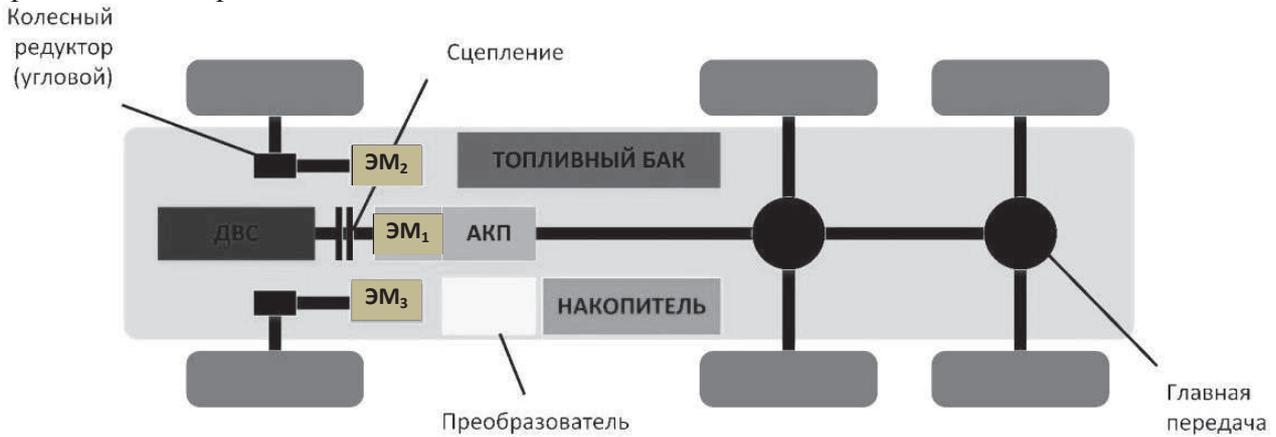


Рисунок 1. Компоновка КЭУ автомобиля

При разработке алгоритмов работы КЭУ необходимо обеспечить управление:

- крутящим моментом ДВС;
- запуском и остановкой ДВС;
- крутящим моментом электромшины между коробкой передач и сцеплением (ЭМ₁);
- крутящим моментом электромашин колес передней оси (ЭМ₂ и ЭМ₃);
- включением и выключением сцепления;
- выбором передачи в коробке передач.

Рассматриваемая компоновка КЭУ имеет усложненную схему построения, что требует разработки дополнительных алгоритмов управления. В ходе решения поставленной задачи были рассмотрены две различные стратегии управления.

Управление с помощью карт распределения мощности

При разработке алгоритмов управления основной задачей является распределение потоков мощности между ДВС, электрическими машинами и батареей. При этом необходимо выдерживать определенное соотношение между количеством требуемой от КЭУ энергии, количеством энергии в батарее и «запросами» водителя.

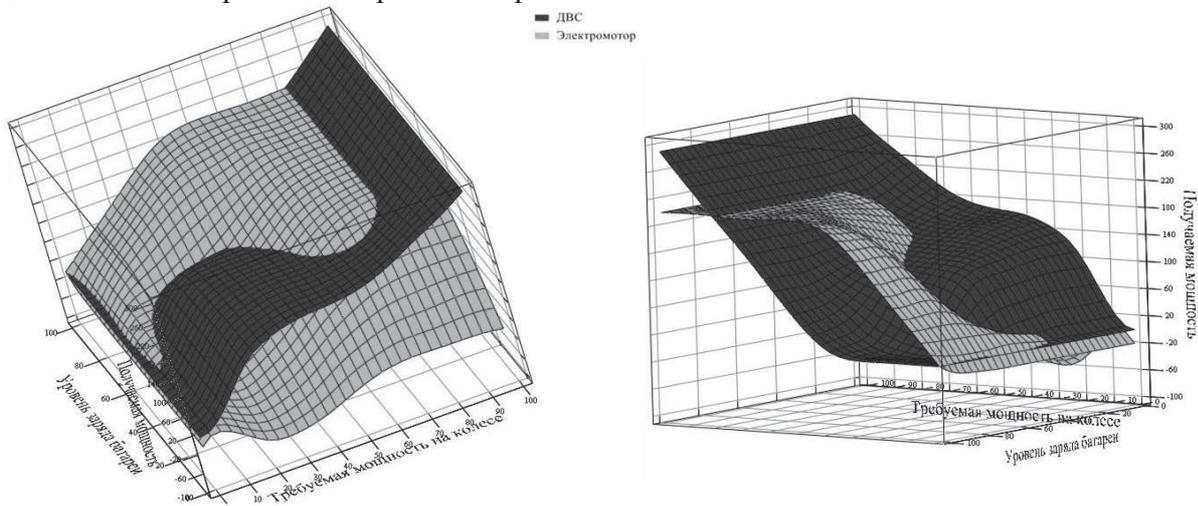


Рисунок 2. Пример карты распределения мощности

Для соблюдения баланса энергии и рационального режима работы батареи необходимо удерживать ее заряд в диапазоне 50-70% в условиях переменных нагрузок и режимов работы. При решении этой задачи была разработана стратегия управления с использованием карт распределения мощности (рисунок 2).

По карте в зависимости от требуемой мощности на ведущих колесах и степени заряда батареи рассчитывается мощность, которая суммарно необходима от электромашин и ДВС. Впоследствии взятые с карты значения корректируются с учетом температуры компонентов и количества топлива в баке с помощью соответствующих коэффициентов.

При требуемой мощности, соответствующей минимальному удельному расходу топлива в ДВС (или близкой к ней), вся ее величина обеспечивается ДВС.

При уменьшении требуемой мощности при низком заряде батареи излишек мощности отбирается электромашинной ЭМ₁ для осуществления зарядки, а при высоком заряде – ДВС не используется и весь объем мощности получается от электромашин.

При увеличении требуемой мощности при низком уровне заряда батареи ДВС начинает работать интенсивнее, при среднем заряде подключаются электромашин в тяговом режиме, а при высоком заряде – включается ДВС и работает совместно с электромашин.

При высоком уровне заряда батареи использование ДВС сводится к минимуму и осуществляется лишь при превышении требуемой мощности значения, равного максимальной мощности, развиваемой электромашин. При низком уровне заряда батареи электромотор не используется в тяговом режиме, а лишь для подзарядки батареи при наличии такой возможности.

При попытке реализации данной стратегии управления в математической модели движения автомобиля были выявлены серьезные недостатки, такие как:

- сложность построения карт с высокой точностью (малым шагом сетки) ввиду невозможности автоматизации данного процесса;
- сложность проведения калибровок;
- низкая точность отработки управляющих воздействий водителя после наложения корректировочных коэффициентов на полученные с карт значения.

Ввиду обозначенных недостатков от данной стратегии управления пришлось отказаться.

Управление с использованием базовых режимов работы КЭУ

В этом варианте реализована стратегия управления, основанная на выборе режима работы КЭУ и расчета нагрузок, исходя из выбранного режима. Стратегия базируется на принципах управления в параллельной схеме КЭУ, адаптированных к дополнительной задаче разделения мощности между несколькими электрическими машин.

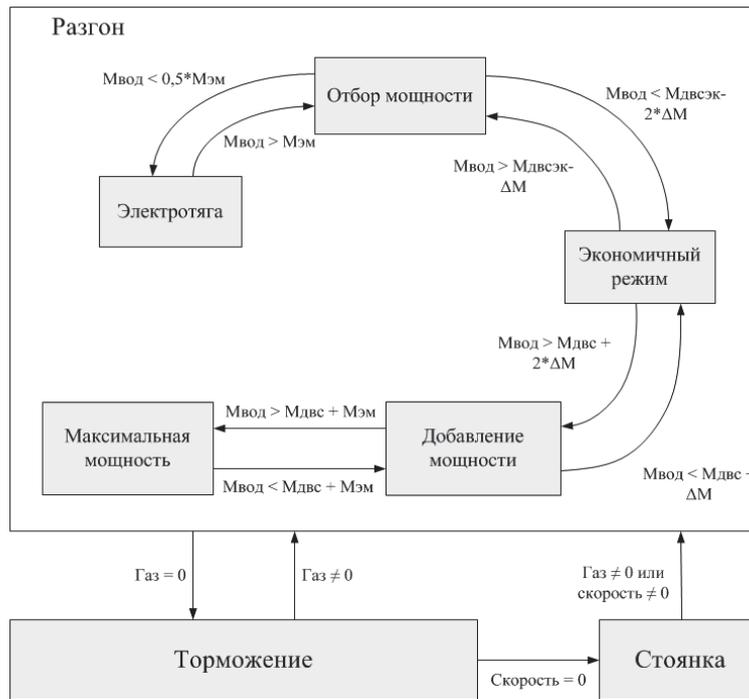
На рисунке 3 показана схема алгоритма выбора режима движения.

Принципиально возможны три варианта движения:

- 1) Подвод энергии к автомобилю (вариант «тяга»). В этом варианте необходимо подводить мощность к ведущим колесам (при этом скорость движения может увеличиваться, оставаться постоянной или падать). При этом компоненты КЭУ можно использовать следующим образом:
 - движение на электротяге: если запрашиваемый водителем крутящий момент возможно обеспечить только за счет электромашин (режим 1);
 - движение на ДВС с отбором мощности: если запрашиваемый водителем крутящий момент невозможно обеспечить только за счет электромашин, но при этом его величина меньше крутящего момента ДВС в экономичном режиме, осуществляется отбор мощности от ДВС с помощью электромашин. При этом ДВС работает в экономичном режиме, электродвигатель – в генераторном (режимы 2, 3);
 - движение на ДВС в экономичном режиме: если требуемый водителем крутящий момент близок по значению к экономичному режиму работы ДВС (режим 4);
 - движение на ДВС с добавлением мощности: если требуемый крутящий момент не обес-

печивается двигателем в экономичном режиме и разница не больше максимального крутящего момента на электромашинах. При этом ДВС работает в экономичном режиме, электромашины – в тяговом (режим 5);

- движение на режиме максимальной мощности: электромашины работают с максимальной нагрузкой, а ДВС в сумме обеспечивает требуемый водителем крутящий момент (режим 6).
- 2) Отбор энергии от автомобиля (вариант «**торможение**»). В этом варианте необходимо забирать мощность от ведущих колес и осуществлять рекуперативное торможение (режим 7).
- 3) Вариант «**стоянка**» (режим 8).



$M_{вод}$ – требуемый водителем крутящий момент

$M_{двсэж}$ – крутящий момент ДВС, соответствующий экономичному режиму работы

ΔM – допустимое отклонение от экономичного режима

$M_{эм}$ – максимальный крутящий момент от электромашины

Рисунок 3. Схема алгоритма выбора режима движения

При варианте «тяга» предпочтительным является движение в режиме 4. При этом будет обеспечиваться наибольшая экономичность при работе ДВС без участия электропривода (то есть без потерь на преобразование энергии и отбор мощности).

Распределение крутящих моментов по описанным выше условиям производится с учетом ограничений на работу электрических машин. Максимально возможный крутящий момент каждой электромашины при текущей частоте вращения определяется ее внешней скоростной характеристикой. При низком уровне заряда батареи, высоком нагреве электромашины, ее инвертора или батареи накладывается ограничение на снимаемый с электромашины крутящий момент.

Расчет крутящих моментов на агрегатах КЭУ производится в соответствии с выбранным режимом движения. Зависимости подобраны таким образом, чтобы в точках перехода между режимами нагрузки на агрегатах по возможности оставались неизменными. Таким образом, обеспечивается плавность смены режимов работы КЭУ.

Дополнительные алгоритмы управления

Управление коробкой передач

Управление коробкой передач осуществляется по критерию выведения ДВС на режим с

наименьшим удельным расходом топлива. Совокупность точек в осях «обороты ДВС» / «крутящий момент», в которых при определенной мощности удельный расход топлива будет минимальным, представляет собой линию оптимальных режимных точек (ОРТ). По величине запрашиваемого в данный момент крутящего момента от ДВС определяется оптимальная частота вращения, а с учетом текущей скорости, и передача в коробке передач с помощью выражения:

$$GearSelect = ((abs(ICE_rev_opt - ICE_rev_prev) * k_gear_choice_down - abs(ICE_rev_opt - ICE_RPM)) < 0) * ShiftDownEnable + ((abs(ICE_rev_opt - ICE_rev_next) * k_gear_choice_up - abs(ICE_rev_opt - ICE_RPM)) < 0) * 2 * ShiftUpEnable$$

где: ICE_rev_opt – оптимальная частота вращения ДВС по топливной экономичности;
 ICE_rev_prev – частота вращения на предыдущей передаче;
 ICE_rev_next – частота вращения на следующей передаче;
 ICE_RPM – текущая частота вращения ДВС;
 $k_gear_choice_down, k_gear_choice_up$ – коэффициенты, исключающие зацикленные смены передач;
 $ShiftDownEnable, ShiftUpEnable$ – коэффициенты, препятствующие немедленной смене передачи в обратную сторону после одного или нескольких переключений, которые могут принимать значения 0 или 1.

По значению переменной $GearSelect$ определяется необходимость:

- повышения передачи (при значении 2);
- понижения передачи (при значении 1);
- сохранения текущей передачи (при значении 0).

Реализация алгоритмов управления в модели VCU

Модель блока управления изображена на рисунке 4.

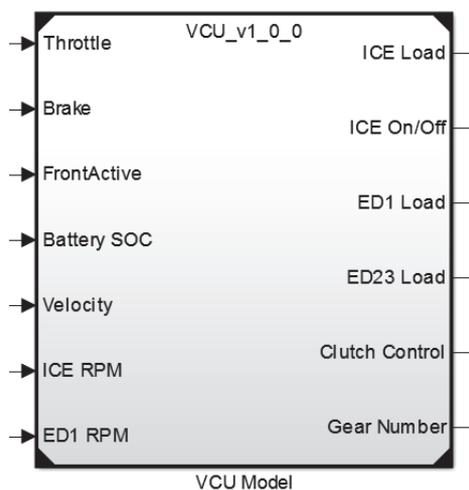


Рисунок 4. Модель блока управления автомобилем с КЭУ, реализованная в MATLAB/Simulink

Блок управления получает следующие входные сигналы:

- 1) Throttle (0..1) – управляющее воздействие водителя в виде перемещения педали подачи топлива;
- 2) Brake (0..100) – управляющее воздействие водителя в виде нажатия педали тормоза;
- 3) Front Active (0,1) – положение тумблера включения и отключения электромашин переднего моста;
- 4) Battery SOC (0..100) – степень заряда батареи, определяющая распределение мощностей в КЭУ, а также включение/отключение ДВС и переход в режим электромобиля;
- 5) Velocity (0... V_{max} , км/ч) – текущая скорость автомобиля;

- 6) ICERPM (500...2500, об/мин) – текущие обороты ДВС;
- 7) ED1RPM (0...2600, об/мин) – текущие обороты первой электромашины (ЭМ₁).

Блок управления имеет следующие выходы:

- 1) ICE Load (0...1) – нагрузка на ДВС, крутящий момент в долях от максимального по внешней скоростной характеристике при данных оборотах (от 0 до 1);
- 2) ICE on/off (0,1) – сигнал, информирующий о необходимости включения или выключения ДВС;
- 3) ED1 Load (-1..1) – нагрузка на электромашину в коробке передач, определяющая величину и направление снимаемого с нее крутящего момента;
- 4) ED23 Load (-1..1) – нагрузка на электромашину переднего моста, определяющая величину и направление снимаемого с нее крутящего момента (для левой и правой электромашин одинакова);
- 5) Clutch Control (0..100) – сигнал, информирующий о необходимости включения или выключения сцепления между ДВС и электромашинной коробки передач.
- 6) Gear Number (1,2..12) – номер передачи, которая должна быть включена в коробке передач.

Состав модели блока управления автомобилем с КЭУ представлен на рисунке 5.

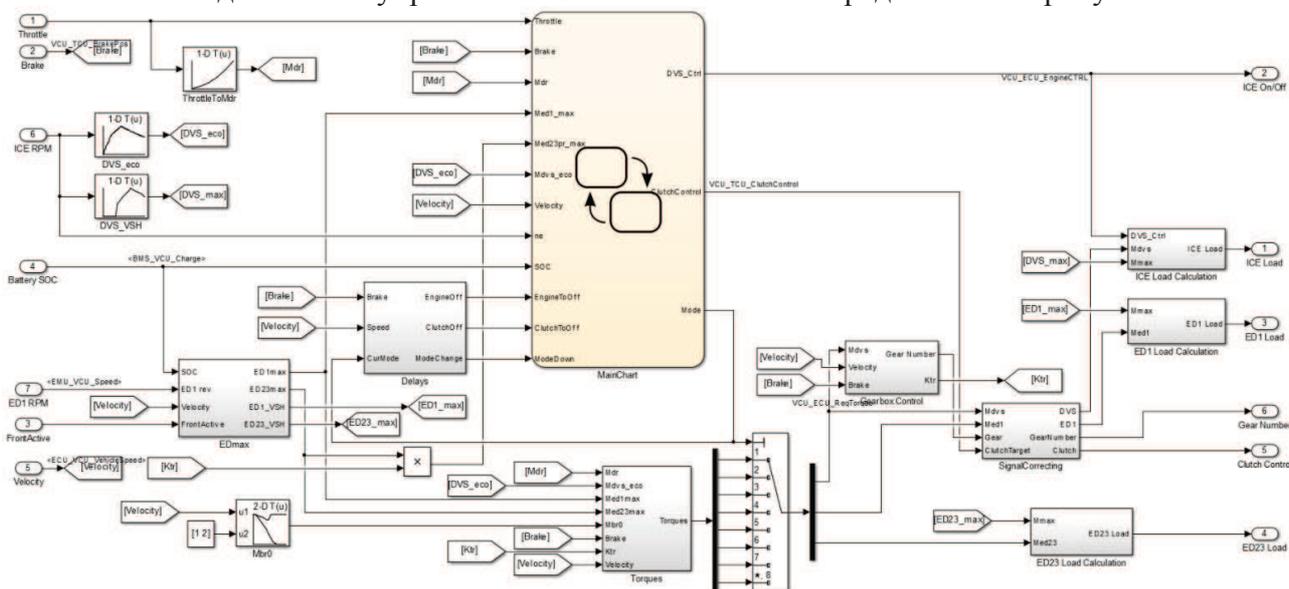


Рисунок 5. Состав модели блока управления автомобилем с КЭУ

Основой модели блока управления автомобилем является диаграмма состояний (конечный автомат) Main Chart. Она отвечает за расчет режима работы КЭУ, управление сцеплением (команды от системы «старт-стоп») и запуском/остановкой двигателя. Выходными сигналами блока Main Chart являются сигнал управления двигателем, используемый для его запуска и остановки, сигнал управления сцеплением при остановке и запуске ДВС и номер режима работы КЭУ, определяющий выбор зависимостей для расчета крутящего момента на агрегатах.

В подсистеме Gearbox Control определяется передача в коробке передач, при которой ДВС будет работать наиболее близко к оптимальной режимной точке (ОРТ), соответствующей требуемой от ДВС в данный момент мощности. Кривая ОРТ задается в табличном виде и с ее помощью по значению требуемой мощности определяются оптимальные обороты ДВС. С оптимальным значением оборотов сравниваются значения оборотов двигателя на текущей передаче и на двух соседних. Если текущая передача не обеспечивает наименьшую разницу в оборотах с оптимальным их значением, осуществляется переключение на одну передачу вверх или вниз (если такая возможность есть).

В подсистеме Signal Correcting осуществляется корректировка сигналов управления ДВС, электромашинной в коробке передач и сцеплением при переключении передач.

Испытания модели блока управления автомобилем проводились в составе модели движения автомобиля в качестве подмодели. Испытания показали адекватную работу алгоритмов управления, обеспечивающую выполнение поставленных задач.

Литература

1. Нагайцев М.В., Кутенёв В.Ф., Эйдинов А.А. Перспективы развития конструкций комбинированных энергоустановок автотранспортных средств. Сборник научных статей «Труды НАМИ», 2013, выпуск № 254, с. 5-19.
2. Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Ali Emadi. 2010. 558 с.
3. Propulsion Systems for Hybrid Vehicles. John M. Miller. 2010. 610 с.

Проблемы развития конструкций тракторов

д.т.н. проф. Шипилевский Г.Б.
Университет машиностроения
495-223-05-23 доб.1527 gbship@mail.ru

Аннотация. В статье представлены соображения автора по наиболее перспективным направлениям развития конструкций тракторов, основанные на анализе влияния новых конструктивных решений на потребительские свойства тракторов. Эти свойства главным образом определяются производительностью, экономичным расходом ресурсов, комфортом и безопасностью работы и экологическими свойствами.

Ключевые слова: тракторы, потребительские свойства, конструкции, производительность, расход ресурсов, комфорт, безопасность, экология, автоматизация, электропривод.

В обозримом будущем тракторы продолжают оставаться одним из основных средств производства в ряде отраслей, жизненно важных для человечества. Достаточно упомянуть только сельское хозяйство, строительство и лесозаготовки, чтобы подтвердить это мнение. В любом случае здесь пока не предложено никакой реальной альтернативы этим машинам.

Можно напомнить также, что общее количество тракторов, используемых в мире, уступает только количеству автомобилей и велосипедов. Поэтому совершенствование конструкций тракторов, направленное на повышение их потребительских свойств, продолжается и будет продолжаться, используя новые возможности науки и техники. Конечно, стимулом для этого является и необходимость развития технологий производства тракторов, но здесь это направление не рассматривается.

Для попытки связать прогноз возможного развития конструкций со стремлением повысить упомянутые свойства тракторов стоит принять, что эти свойства в основном сводятся к производительности, экономному расходу ресурсов (главным образом горюче-смазочных), комфорту и безопасности работы водителя и щадящему воздействию на окружающую среду. При этом имеет смысл рассматривать отдельно количественное (параметрическое) развитие, связанное с изменениями тех или иных абсолютных или удельных показателей, и развитие качественное, опирающееся на использование принципиально новых конструктивных решений. И понятно, что такой анализ будет весьма субъективным, основанным на личном отношении автора к тем или другим фактам.

Далее укажем, что основой такого анализа должны стать в основном сведения о предполагаемом развитии технологий тех производств, в которых используются тракторы. И здесь личные представления автора заставляют ограничивать рассмотрение этого развития только отечественным сельскохозяйственным производством, где в обозримой перспективе не просматриваются какие-то радикальные изменения, в то время как остальные направления такой уверенности не дают (да и автор не слишком глубоко знаком с их технологиями).

И наконец, нужно признать, что попытка такого анализа делается автором впервые, и в