

Структура и динамика управления электрическим приводом тракторов

д.т.н. проф. Шипилевский Г.Б., к.т.н. Новиков Г.В.
Университет машиностроения, МГТУ им. Баумана
(495)-223-05-23, доб. 1527, gbship@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы особенностей режимов работы и управления тракторами с электроприводами с учётом динамических свойств объектов управления и требований к его качеству. Объектами являются тяговый привод, в том числе в режиме поворота гусеничного трактора, приводы ВОМ и насоса гидросистемы и энергетическая установка ДВС-генератор.

Ключевые слова: трактор, электропривод, тяговый электродвигатель, поворот, привод ВОМ, привод насоса, ДВС-генератор.

Расширяющийся и обоснованный интерес к применению электропривода в трансмиссиях тракторов, в том числе сельскохозяйственных, объясняется очевидными преимуществами, в числе которых более высокая надёжность, снижение трудоёмкости обслуживания, а главное – возможность бесступенчатого регулирования скорости со своими, давно известными достоинствами. Поэтому он стал фактом, заставляющим обратить внимание на необходимость проработки целого ряда проблем. Считая, что продолжающееся совершенствование конструкций и технологий производства электрических тяговых машин, вентильных преобразователей и аппаратуры управления в сочетании с неизбежным удешевлением наверняка приведёт к расширению производства тракторов с такими трансмиссиями, стоит уже сейчас попытаться решить ключевые вопросы этих проблем, в том числе связанные с управлением. Ведь только правильное управление позволит в полной мере реализовать те несомненные преимущества, которые по праву ожидаются от результатов такого развития.

Поскольку процессы управления и автоматического регулирования являются динамическими, их решение должно производиться с учётом таких же характеристик объектов и средств управления. При этом необходимо, чтобы задачи управления были сформулированы с предельной конкретностью, возможно, вплоть до указания критериев качества и возмущающих воздействий. А так как последние далеко не всегда могут быть указаны в количественных выражениях не только детерминированного, но и вероятностного характера, задачи синтеза усложняются, но тем не менее могут решаться с большей или меньшей достоверностью. Результатами решения должны быть однозначные рекомендации по выбору аппаратных и программных средств управления для каждого объекта.

Разумеется, такое решение этой задачи трудновыполнимо, поскольку задача эта вариативна. Но стремиться к решению нужно, даже если удастся получить неоднозначное решение, а только поле решений, из которого впоследствии можно будет выбрать единственное решение по косвенным показателям назначения.

Виды электрических приводов тракторов

Начнём с того, что, говоря об электрических тракторах, следует говорить не об электрической трансмиссии, точнее, не только о ней, а об электрическом тяговом приводе. В отличие от трансмиссии в привод входит и источник энергии. Чаще всего это двигатель внутреннего сгорания (ДВС). Но в последнее время в качестве источников энергии автомобилей и тракторов используются также и электрические аккумуляторы, и электро-химические генераторы [1], и даже солнечные батареи. Последние устанавливаются на крыше кабины и пока применяются (на тракторе TTV 7.260 фирмы Same Deutz-Fahr [2]) только для привода вентиляторов в кабине, пока ДВС не работает. Примем их все во внимание, но рассматривать здесь будем только тракторы с ДВС.

Особенности схемного построения

Прежде всего укажем, что основными силовыми компонентами электрического привода с ДВС и объектами управления будет следующий их набор:

- двигатель внутреннего сгорания ДВС;
- тяговый генератор с приводом от ДВС;

- тяговые электродвигатели (их может быть 1, 2, 3 или по числу колёс);
- электродвигатель привода ВОМ;
- электродвигатель привода вентилятора;
- электродвигатель привода насоса гидросистемы.

Схемное построение электрической трансмиссии тягового привода может быть весьма различным. В зависимости от конструкции трактора ней может быть:

- один тяговый электродвигатель, соединённый с главной передачей ведущего моста (как на тракторах ДЭТ, NH₂ мощностью 100 кВт фирмы New Holland [1] и Беларус-3023 мощностью 200 кВт [3]);
- два электродвигателя для отдельного вращения ведущих колёс гусеничного трактора или соединения с главными передачами ведущих мостов полноприводного колёсного трактора;
- три электродвигателя для маловероятного, но возможного варианта, когда задние колёса колёсного трактора приводятся двумя отдельными электродвигателями, а передние – одним через главную передачу;
- четыре, когда все ведущие колёса колёсного трактора (или гусеничного трактора Steiger Rowtrac фирмы Case IH, имеющего 4 гусеницы) приводятся индивидуально;
- тяговых электродвигателей может быть и больше, если у трактора будет большее количество колёс, как, например, у трактора Trisix Vario [4] фирмы Fendt, имеющего 6 колёс.

В первом случае, т.е. при использовании только одного электродвигателя, электрическая трансмиссия просто заменяет коробку передач механической трансмиссии. Даже в этом простейшем варианте электрического привода достоинства, получаемые трактором, столь велики, что работа на таком тракторе приводит в восторг сначала испытателей, а потом и пользователей таких тракторов.

При применении более чем одного тягового электродвигателя достоинства трактора значительно увеличиваются. Часто при этом применяются механизмы «мотор-колесо», в которых электродвигатель с выходным редуктором и тормозом помещают в ступицу колеса.

Электропривод может использоваться и для всех вспомогательных механизмов трактора, потребляющих мощность. Особенность электропривода для таких нагрузок на тракторе состоит в расширенных или даже в совершенно новых возможностях управления ими.

Прежде всего стоит рассмотреть приводы ВОМ, учитывая, что на тракторе может быть до трёх ВОМ: задний, передний и боковой, каждый со своим преобразователем и принципом управления. Заметим, что электродвигатель привода ВОМ может быть достаточно мощным. Так, на упомянутом выше тракторе NH₂ фирмы New Holland имеются два электродвигателя равной мощности по 100 кВт: один тяговый и второй для привода ВОМ.

Привод ВОМ должен иметь достаточно простые задачи управления. В зависимости от выбора водителя необходимо в режиме независимого ВОМ обеспечивать постоянную стандартную частоту вращения хвостовика (при необходимости через редуктор). В режиме синхронного ВОМ придётся обеспечивать частоту вращения хвостовика, находящуюся в постоянной пропорции со скоростью трактора. Возмущающими воздействиями здесь можно считать колебания крутящего момента нагрузки.

В перспективе можно рассмотреть возможности повышения частоты вращения хвостовика. Кроме того, не исключено и такое революционное решение, когда на тракторе больше не будет привода ВОМ, а машины с активными рабочими органами будут комплектоваться собственными электродвигателями и преобразователями, так что с трактора нужно будет передавать только напряжение питания и команды управления через соответствующие кабели.

Относительно целесообразности использования электропривода для вентилятора системы охлаждения ДВС имеются некоторые сомнения. На тракторах в отличие от автомобилей гораздо больше суммарная толщина радиаторов и отсутствует интенсивный встречный поток воздуха. Поэтому необходимая для привода вентилятора мощность и соответствующие габариты электродвигателя должны быть значительны. Но такая система способствует снижению уровня шума, потребности в мощности для системы охлаждения (она работает «по

необходимости», т.е. со снижением нагрузки мощность охлаждения можно снижать) и, таким образом, расхода топлива.

На тракторах Arion 500/600 фирмы Claas такая система электронного управления вентилятором Vistronic имеется [5]. Есть такие системы и на других тракторах, не имеющих, также как Arion, тягового электропривода. На тракторах E Premium 7530 фирмы John Deere [6] электродвигатель вентилятора мощностью 11 кВт дополнительно имеет режим «обратной функции»: он может отключаться и включаться на 30 секунд назад, осуществляя продувку радиатора. Компрессор кондиционера и водяной насос низкотемпературной циркуляции (для охлаждения трансмиссии и надувочного воздуха) также приводятся электродвигателем с регулируемой скоростью вращения. John Deere полагает, что благодаря всему этому расход топлива снизится на 5 %.

Управление приводом насоса гидросистемы несколько сложнее. Считая, что на современных тракторах её действие не будет ограничиваться только подъёмом и опусканием навесного устройства, придётся принимать решение с целью обеспечения такой же функциональности, какая имеется в системах, чувствительных к нагрузке. Здесь либо должен будет использоваться регулируемый насос с постоянной частотой вращения, либо насос нерегулируемый, но с изменяющейся частотой вращения. Насколько нам известно, пока сведений для обоснованного выбора не имеется, и даже в известных образцах тракторов с электрической трансмиссией используются насосы с приводом от ДВС. В этих обстоятельствах анализ динамики пока делать преждевременно.

Элементы электрического привода могут отличаться и мощностью, и конструкцией, и присоединением и давать новые качества трактору. Так, на упомянутых выше тракторах E Premium 7530 новый генератор собственных нужд мощностью 20 кВт установлен как маховичный тяговый генератор и приводит электродвигатель вентилятора мощностью 11 кВт и питает бортовую сеть.

В таких тракторах часто используется режим внешнего питания. Трактор E Premium 7530 оборудован двумя электрическими розетками для подключения внешних нагрузок мощностью до 20 кВт. А трактор Беларусь-3023 способен питать внешние потребители электроэнергией мощностью в 10 раз больше.

Автоматическое управление

Существенным достоинством электропривода является его лёгкая регулируемость. Если для механической трансмиссии любое управление выливается в серьёзную проблему, то для электрической оно достигается простейшими средствами. На рисунке 1 изображена принципиальная схема тягового привода с электрической трансмиссией и системой автоматического регулирования САР.

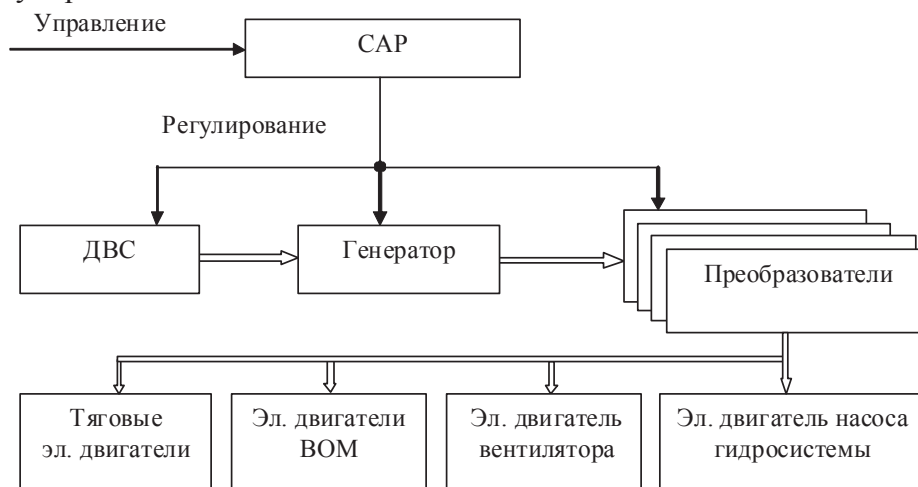


Рисунок 1. Структурная схема электропривода трактора с САР

Общая САР включает группу частных систем управления каждым из этих объектов управления. Частные системы обычно автономны, но взаимосвязаны, поскольку на работу

каждого объекта влияют остальные.

Для каждого из этих объектов существуют свои формулировки задач управления и требования по качеству в виде допусков на отклонения регулируемых параметров от задаваемых значений. Динамические свойства объектов также не следует считать полностью идентичными.

Принимается, что на тракторе должна действовать система управления по крайней мере двух (а чаще [7] трёх и более) уровней. На низших уровнях ведётся непосредственное управление каждой из составных частей привода, на среднем – выполняться их согласование, а на высшем уровне определяются задания для каждого из них.

Особенности тягового электропривода

Анализ целесообразно начать с тягового привода. Его задачей является осуществление вращения ведущих колёс с заданной частотой, соответствующей заданной водителем теоретической скорости (в последующем буксование движителей в расчёт приниматься не будет, поэтому определение «теоретическая» далее будет опущено) или с заданной тяговой нагрузкой.

Следует обратить внимание на то, что управление в тракторе с тяговым электроприводом водитель осуществляет не непосредственным воздействием на элементы привода, а опосредовано, воздействием на систему автоматического регулирования. По существу водитель просто задаёт необходимую скорость движения трактора или режим работы трактора и/или ВОМ, что в конечном итоге приводит к получению тех или иных частот вращения валов электродвигателей.

В простейшем случае при прямолинейном движении все тяговые электродвигатели можно условно рассматривать как один электродвигатель, учитывая, что в некоторых схемах будет иметь место различие частот вращения в соответствии с местом установки электродвигателей или различием радиусов колёс. В любой схеме должна обеспечиваться одинаковая скорость, если не считать, что в колёсных тракторах может быть предусмотрено кинематическое несоответствие.

Нужно отметить, что ни одна из известных операционных технологий сельскохозяйственного производства не содержит каких-либо требований не только к точности поддержания заданной скорости, но и к величине этой скорости вообще. Можно только упомянуть такие операции, как посев или междурядная культивация, для которых рекомендуется скорость не более 10 км/час. Если считать, что при выполнении таких операций ДВС работает на регуляторной ветви характеристики и переключения передач не делаются, то отклонения частоты вращения его вала будут при медленно меняющихся нагрузках не более чем 5% среднего значения. Высокочастотные изменения нагрузки в спектре после примерно 2 Гц вообще поглощаются инерцией движущихся масс. Учитывая, что электропривод при должном регулировании может обеспечить гораздо более высокую точность поддержания частоты вращения валов электродвигателей, можно считать, что здесь каких-либо ограничений не имеется.

Управление электродвигателями

Описание динамики регулирования тяговых электродвигателей приводится с учётом того, что во всех современных инверторах статических вентильных преобразователей частоты, если в приводе используется частотное управление, или электронных коммутаторов, если применяются вентильные или индукторные электродвигатели (в их системах управления), имеются встроенные ПИД-регуляторы в обоих имеющихся у них каналах регулирования, и применяется их самонастройка. Поэтому проблемы устойчивости работы привода с САР сейчас решаются простой стандартной настройкой этих регуляторов.

На рисунке 2 показана структурная модель тягового привода в части управления электродвигателями независимо от того, какого именно типа тяговые электродвигатели применяются в электрической трансмиссии тягового привода трактора.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

САР – общая система автоматического регулирования тягового привода;

ТЭД – тяговый электродвигатель;

П – преобразователь частоты или силовой коммутатор;

СУ – система управления каждого (если их несколько) преобразователя частоты или коммутатора;

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор;

i_{yf} – сигнал управления частотой f питающего электродвигателя напряжением;

i_{yU} – сигнал управления амплитудой, точнее – действующим значением, питающего напряжения U ;

M – крутящий момент;

$I_{ЭД}$ – ток статора;

$T_{ДЭЛ}$ – электромагнитная постоянная времени электродвигателя;

$T_{МЕХ1}$ – механическая постоянная времени двигателя совместно с колесом;

$T_{МЕХ2}$ – механическая постоянная времени двигателя совместно с колесом и трактором.

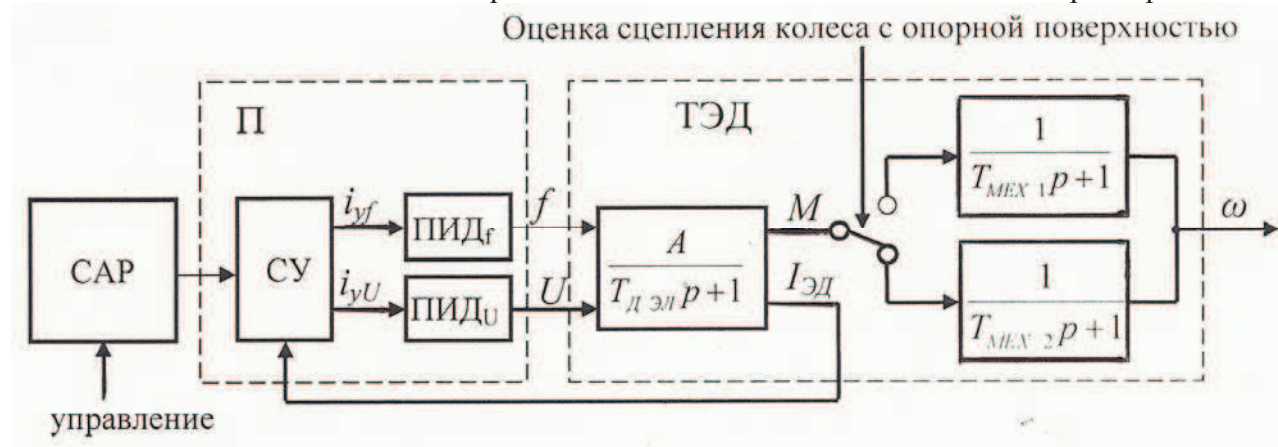


Рисунок 2. К анализу динамики управления тяговым электродвигателем

Блок переключения в канале управления скоростью отражает известный факт того, что при хорошем сцеплении колеса с дорожным покрытием динамика колеса (если речь идёт о колёсном тракторе) определяется инерцией электродвигателя совместно с колесом и поступательно движущимися частями трактора, а при плохом сцеплении, когда возникает разное буксование, инерцией электродвигателя совместно с одним только колесом. Очевидно, что $T_{ДЭЛ} \ll T_{МЕХ1} \ll T_{МЕХ2}$. Понятно, что схема отображает крайние случаи, а на практике факт наличия буксования учитывается обычными правилами приведения масс.

Отдельно нужно рассматривать управление приводом в режиме трогания и разгона, когда трактор должен начать движение и разогнаться до заданной скорости. Здесь должно действовать ограничение ускорения трактора, которое не опирается на какие-нибудь регламентированные нормы, хотя в некоторых источниках указывается предел, равный 1 м/сек^2 . Кроме того, на высшем уровне должно отслеживаться ограничение темпа роста нагрузки на ДВС, чтобы не допустить его заглохания.

Управление двигатель-генераторной установкой

Управление генератором также имеет свою специфику. Здесь нужно иметь в виду, что генератор определяет загрузку ДВС крутящим моментом, и величина этого момента, зависящая от суммарного тока питания всех потребителей с их средствами управления, наряду с настройкой регулятора подачи топлива в ДВС и частотой вращения его вала определяют режим работы ДВС. Здесь всё известно достаточно давно – произведение задаваемой водителем скорости на величину суммарного сопротивления движения определяет требуемую мощность, которую должен развивать ДВС, а режим его работы при этой мощности должен быть наиболее экономичным по расходу топлива. Однако рекомендации по реализации такой совместной работы ДВС и генератора, насколько нам известно, не сформулированы, что оставляет нам возможность предложить своё видение этой проблемы.

Благодаря непрозрачности электрической тяговой трансмиссии частота вращения ДВС не зависит ни от загрузки трактора, ни от режима работы электродвигательной установки трансмиссии. Это обстоятельство позволяет автоматически управлять ДВС независимо от

управления трактором.

Напряжение генератора U_G пропорционально частоте вращения ω_G его вала, приводимого ДВС, и в случае применения обычного синхронного генератора в основном определяется током возбуждения I_B (при применении синхронного генератора с постоянными магнитами этот ресурс недоступен):

$$U_G = k_G \omega_G I_B. \quad (1)$$

Структурная схема системы управления двигатель-генераторной (или энергосиловой) установкой тягового электропривода показана на рисунке 3.

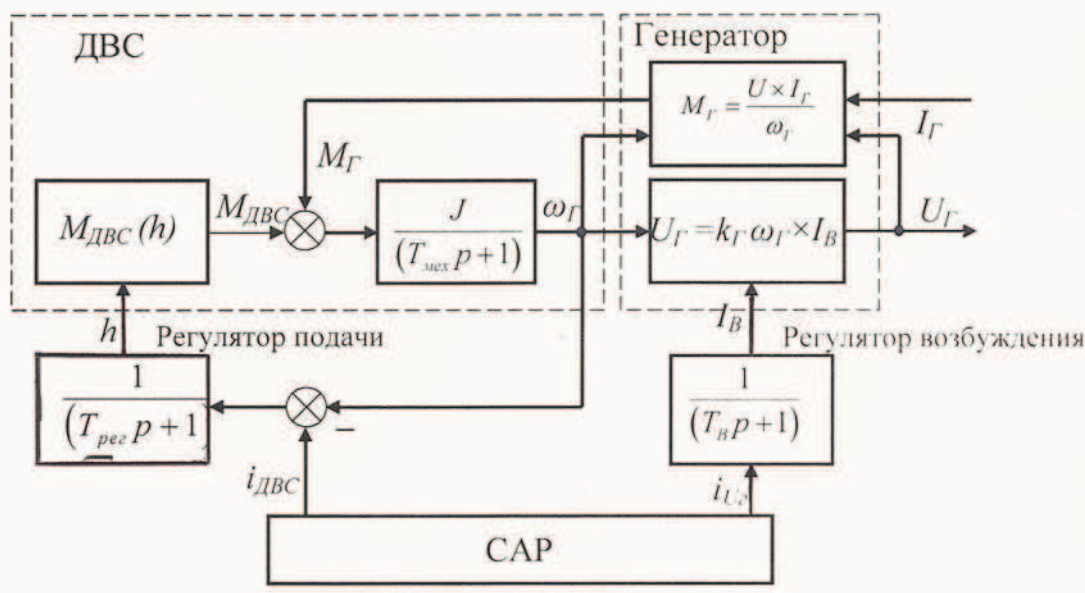


Рисунок 3. Структурная схема модели двигатель-генераторной установки электропривода

На рисунке 3 приняты следующие обозначения:

$i_{ДВС}$ и i_{U_G} – сигналы управления (уставки регулирования) соответственно частотой вращения вала ДВС и напряжением генератора, вырабатываемые САР привода и поступающие от него;

$M_{ДВС}$ – крутящий момент ДВС;

M_G – момент сопротивления генератора;

h – позиция органа подачи топлива ДВС;

$T_{рег}$ – постоянная времени регулятора подачи топлива;

$T_{мех}$ – механическая постоянная времени ДВС с генератором на его валу;

T_B – постоянная времени регулирования тока возбуждения генератора.

Входными сигналами управления являются сигналы управления напряжением генератора и частотой вращения ДВС (формируемые САР привода), выходными параметрами – напряжением в общей шине. Алгоритмы управления здесь направлены на обеспечение такого режима работы ДВС, который при неполной загрузке по мощности выводит его на минимальный удельный расход топлива. Они давно и подробно описаны в литературе, и можно не повторять эти описания, а сослаться, например, на [8].

Режим поворота

Управление приводом при повороте трактора зависит от схемы расположения электродвигателей. На колёсных тракторах при входе в поворот должно происходить изменение задаваемых скоростей передних колёс в зависимости от угла их поворота. В схемах с двумя двигателями для привода задних колёс или четырьмя двигателями скорости должны изменяться в соответствии с планом скоростей и размерами базы и колеи – с внутренней стороны уменьшаться, а с внешней увеличиваться на ту же величину. В схемах с приводом переднего моста одним двигателем или двумя двигателями его средняя скорость должна увеличиваться

по сравнению со средней скоростью заднего моста по соотношению

$$V_{\text{пм}} = V_{\text{зм}} / \cos \alpha_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где: $V_{\text{пм}}$ – средняя скорость по переднему мосту;

$V_{\text{зм}}$ – средняя скорость по заднему мосту;

$\alpha_{\text{ср}}$ – средний угол поворота управляемых колёс.

Кстати говоря, такой режим движения будет обеспечивать лучшую управляемость по сравнению с тракторами обычной конструкции, в которых при входе в поворот приходится отключать привод переднего ведущего моста. Это может позволить иметь меньше балласта спереди даже при работе с тяжёлым навесным орудием.

Динамику поворота гусеничного трактора нужно рассматривать только для случая использования двух двигателей, вращающих ведущие колёса. При одном двигателе трактор должен иметь обычный механизм поворота. Можно, конечно, предусмотреть некоторое повышение скорости при входе в поворот при механизме с разностно-тяговым действием, но такой вариант вряд ли стоит считать перспективным.

При двух двигателях необходимость и в главной передаче, и в механизме поворота исчезает, и здесь без каких-либо затруднений вполне реализуем разностно-скоростной способ управления поворотом. Проще всего снижать скорость отстающей гусеницы и повышать скорость забегающей на одну и ту же величину, сохраняя среднюю скорость трактора на том же уровне. Однако отмеченная выше инерционность привода приведёт к тому, что желательная угловая скорость поворота, задаваемая воздействием водителя, будет достигаться с некоторым запаздыванием. С одной стороны, это смягчит возможные перегрузки, природа которых была рассмотрена в [9]. Но не исключено, что управление трактором может оказаться слишком «медлительным».

Для компенсации нежелательных последствий такого управления может быть предложено применить форсирование по первой производной и наложение дополнительной обратной связи по фактической угловой скорости поворота. Суть этих действий заключается в принятии принципиального решения о том, что управляющее воздействие водителя в виде поворота штурвала или поперечного отклонения джойстика должно означать заданную угловую скорость поворота трактора, величина которой должна быть пропорциональна этому воздействию. В свою очередь, оба ведущих колеса должны получить разнонаправленные приращения частот вращения $\Delta\omega$, определяемые соотношением:

$$\Delta\omega = \omega_{\text{зад}} B / 2r; \quad (3)$$

в котором: $\omega_{\text{зад}}$ – задаваемая угловая скорость поворота; B – ширина колеи; r – радиус ведущего колеса.

Нужно, однако, учитывать и то, что вход трактора в поворот также обладает инерцией вследствие бокового скольжения гусениц, так что фактическая угловая скорость будет выражаться следующим соотношением в операторном виде

$$\omega_{\text{факт}} = 2 \Delta\omega \times r \times B / (T_0 \times r + 1), \quad (4)$$

в котором: T_0 – постоянная времени неустановившегося поворота, зависящая от массы объекта и грунтовых условий; r – оператор дифференцирования.

Для компенсации этой инерции целесообразно наложить дополнительную обратную связь по фактическому протеканию поворота, для чего на тракторе должно вестись измерение его угловой скорости, не связанное с вращением ведущих колёс, а выполняемое автономным датчиком. В результате этого измерения к приращениям $\Delta\omega$ должна добавляться поправка $\delta\omega$, определяемая соотношением

$$\delta\omega = A \times (\omega_{\text{зад}} - \omega_{\text{факт}}), \quad (5)$$

в котором A – коэффициент пропорциональности, найденный опытным путём в ходе испытаний или с помощью компьютерного моделирования.

Эта обратная связь даст ещё один полезный эффект. Она будет способствовать стабилизации заданного режима движения, в том числе прямолинейного (который можно трактовать как задание поворота с нулевой угловой скоростью), препятствуя действию неизбежных возмущений. Одним из них, и достаточно вероятным, и довольно значительным, может быть

асимметрия тяговой нагрузки [10].

Для полной компенсации инерционности может быть также добавлено форсирование команды управления $\omega_{зад}$ по производной с постоянной времени T_ϕ , которую также придётся определять экспериментально. Ориентировочно область поиска значений T_ϕ можно указать вблизи суммы значений T_0 и $T_{МЭХ2}$, хотя здесь могут быть затруднения. Если $T_{МЭХ2}$ определяется массами частей объекта и может быть определена довольно точно, то T_0 больше зависит от условий поворота и её оценка априори будет приближительной.

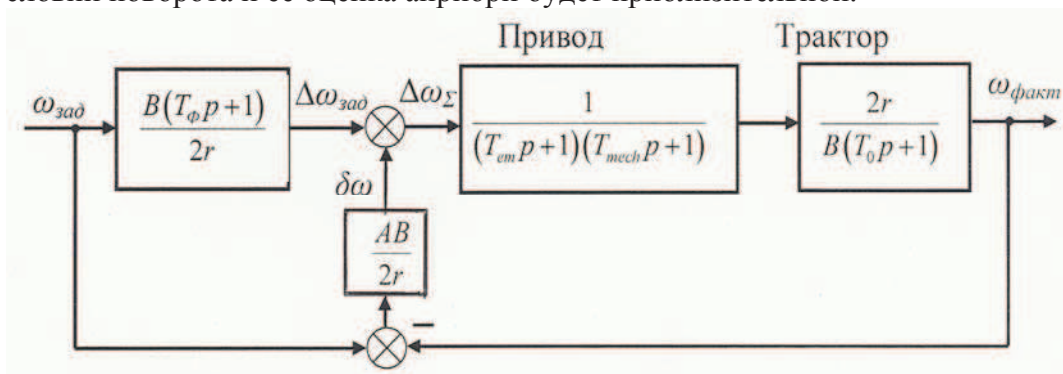


Рисунок 4. Схема связей предлагаемой системы управления поворотом гусеничного трактора

Нужно добавить, что на гусеничном тракторе полезно также иметь возможность разворота на месте с разнонаправленным вращением ведущих колёс. Такой манёвр может облегчить операцию соединения трактора с орудием, но при этом должна быть обеспечена необходимая безопасность. Динамика такого разворота особых требований не предъявляет, хотя можно говорить о недопустимости перерегулирования. Возможно, что в этом режиме (вход в который должен включаться и удерживаться отдельным органом управления с автоматическим возвратом в исходное состояние) будет целесообразно отключать форсирование по первой производной.

Динамические свойства и связи рекомендуемой системы управления в виде преобразования заданной угловой скорости поворота в фактическую показаны на рисунке 4. В ней нужно учитывать, что постоянной времени $T_{дэл}$ (на рисунке обозначена как T_{em}) можно пренебречь из-за её малости по сравнению с $T_{МЭХ2}$.

Вывод

Управление тяговыми электроприводами тракторов и их компонентами следует формировать с учётом характеристик и особенностей управляемых объектов и режимов их работы. Только такое, рационально организованное управление позволит в полной мере реализовать те преимущества, которые обещает это направление развития тракторной техники.

Литература

1. Agritechnica: Next generation hydrogen tractor. // Profi. Tractors and farm machinery, 2011.
2. <http://www.profi.com/news/EIMA-More-power-for-Deutz-TTV-40040.html>
3. Флоренцев С.Н., Изосимов Д.Б., Макаров Л.Н., Усс И.Н., Шарангович А.И. Трактор с электромеханической трансмиссией. // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 2010, № 7
4. Интеллектуальная технология для королевского класса. // Современная сельхозтехника и оборудование, 2008, вып. 1, с. 26-28.
5. Новый модельный ряд тракторов Arion 500/600 от Claas. // Profi. Tractors and farm machinery, 2012.
6. С напряжением в будущее. // Современная сельхозтехника и оборудование, 2008, вып. 1, с. 26-28.
7. Новиков Г.В. Теория и принципы автоматического регулирования многодвигательных бесступенчатых трансмиссий. // Тракторы и с.х. машины, 2005, № 4, с. 20-26.
8. Новиков Г.В. Система адаптивной автоматической оптимизации работы двигателя на тракторе с бесступенчатой трансмиссией. // Тракторы и сельскохозяйственные машины,

2006, № 1.

9. Шипилевский Г.Б. Особенности динамики неустановившегося поворота гусеничного трактора с разностно-скоростным механизмом. // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1995, № 5.
10. Шипилевский Г.Б. Особенности управления индивидуальным приводом ведущих колёс машины при асимметричной тяговой нагрузке. // Известия МГТУ «МАМИ», 2010, № 2.