

СИСТЕМА РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА

Рассмотрены вопросы проектирования системы рулевого управления автомобильного тренажера с учетом значимых составляющих механических моментов имитации усилия на рулевое колесо. Проведен анализ возможной реализации системы регулирования на базе синхронной и асинхронной машин. Приведены результаты виртуального эксперимента по исследованию рулевого управления тренажера в программной среде Simulink.

Введение

Требования к современным комплексным автомобильным тренажерам (КАТ) в настоящее время весьма жесткие и удовлетворить их средствами одной лишь компьютерной графики невозможно. Функционально полный современный КАТ [1] должен включать в себя помимо средств «зрительной симуляции» средства «чувствительной (перегрузочной) симуляции». При обучении водителей на чисто компьютерных тренажерах всегда есть и будет опасность подготовки не реальных, а «виртуальных специалистов», способных к профессиональному выполнению реальных задач.

Одним из наиболее важных элементов КАТ, с точки зрения обучения вождению, является рулевое управление. Основным фактором создания рулевого управления КАТ является имитация динамических усилий и моментов сопротивления на руле. Поэтому необходимо создать устройство, имитирующее механический момент сопротивления на руле с целью динамического подобия. Поскольку усилие на руле воспринимается обучающимся субъективно, то не требуется высокая точность его имитации. В связи с этим необходимо разработать математическую модель рулевого управления КАТ с целью определения существенных составляющих, влияние которых необходимо учитывать, и несущественных, влиянием которых можно пренебречь при имитации усилия на рулевом колесе автомобильного тренажера. Поскольку под динамическим подобием понимают такое подобие, при котором уравнения движения автомобиля и тренажера подобны, то для разработки математической модели рулевого управления КАТ целесообразно воспользоваться классической теорией управляемости автомобиля.

1 Математическая модель рулевого управления КАТ

Если усилитель рулевого привода отсутствует, то при входе в поворот водитель должен приложить к рулевому колесу силу P_p , которая на плече R_p , равном радиусу рулевого колеса, создает момент, равный с учетом передаточного числа i_{py} рулевого управления и его КПД η_{py} , сумме стабилизирующих моментов, действующих на колеса [2, 3]:

$$P_p = \frac{\sum M_{сш} + \sum M_{cy} + \sum M_{cz} + M_{\omega} + M_B + \sum M_R}{R_p \cdot \eta_{py} \cdot i_{py}},$$

где $\sum M_{сш}$ – стабилизирующий момент шины; $\sum M_{cy}$ – стабилизирующий момент, обусловленный продольным наклоном оси поворота управляемого

колеса; $\sum M_{cz}$ – стабилизирующий момент, обусловленный поперечным наклоном оси поворота управляемого колеса; M_{ω} – момент сопротивления повороту колеса относительно шкворня; $\sum M_R$ – суммарный момент, создаваемый продольными силами относительно шкворней.

Проанализировав составляющие момента сопротивления, можно выделить существенные и несущественные составляющие при имитации усилия на рулевом колесе автомобильного тренажера при различных режимах движения:

– момент M_{ω} необходимо учитывать при малых скоростях движения и больших угловых скоростях поворота управляемых колес, т.к. он оказывает существенное влияние на сопротивление повороту рулевого колеса;

– момент M_{cy} принимает существенное значение при высоких скоростях движения и больших углах поворота управляемых колес. M_{ω} и M_{cy} вносят наибольший вклад в результирующий момент;

– $M_{cш}$ можно не учитывать, если пренебрегать уводом. В случае увода его влияние существенно возрастает, и его необходимо учитывать;

– значение момента M_{cz} мало по сравнению со значениями вышеописанных моментов, но его необходимо учитывать при малых скоростях движения и больших углах поворота управляемых колес, т.к. он обеспечивает возврат рулевого колеса в нейтральное положение;

– значение момента M_B не превышает 50 Нм при максимальном угле поворота. Это значение на порядок меньше значения M_{ω} при малых скоростях движения и M_{cy} при больших;

– значение M_R незначительно по сравнению с остальными моментами на благоустроенных дорогах.

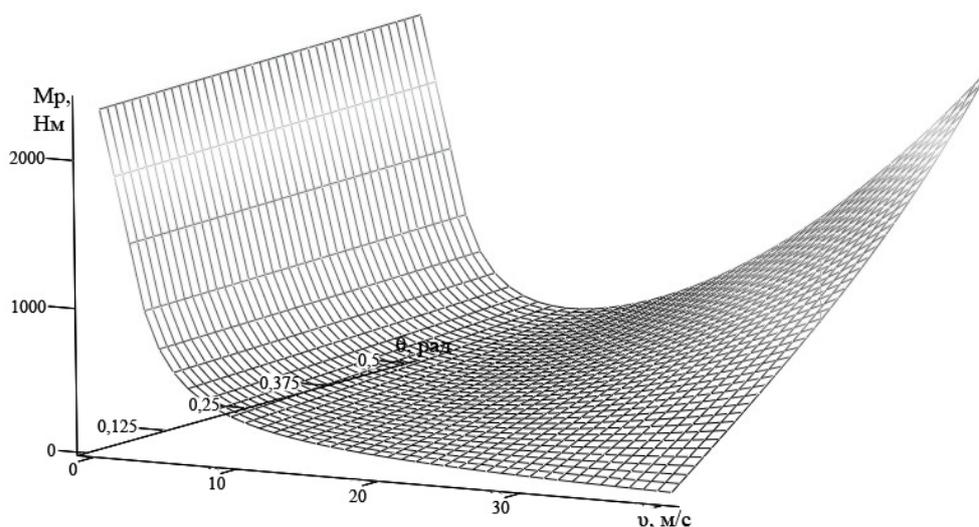
Представляет определенный интерес изменение величины результирующего момента M_p при резком повороте управляемых колес и при возвращении их в прежнее положение. В начальный момент времени при прямолинейном движении автомобиля и отсутствии действующих на него боковых сил все составляющие результирующего момента равны нулю. После появления некоторого угла поворота колес появляется стабилизирующий момент M_c , величина которого по мере роста угла поворота будет увеличиваться как вследствие увеличения весовой стабилизации, так и вследствие увеличения центробежной силы. Суммарная величина момента, необходимого для поворота колес, будет равна

$$M_p = \sum M_{cш} + \sum M_{cy} + \sum M_{cz} + M_{\omega} + M_B + \sum M_R,$$

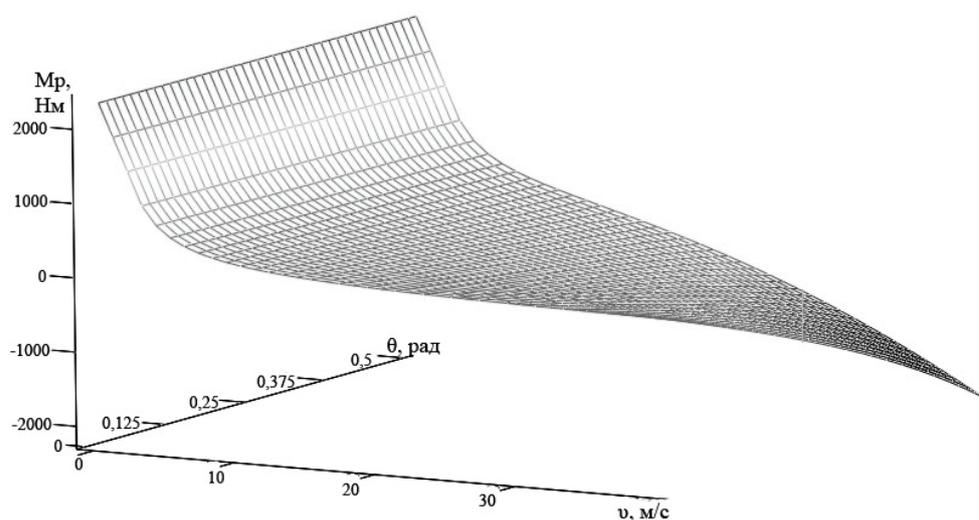
а при возвращении управляемых колес в среднее положение

$$M_p = -\sum M_{cш} + \sum M_{cy} + \sum M_{cz} + M_{\omega} + M_B + \sum M_R.$$

С целью анализа влияния составляющих моментов на результирующий механический момент рулевого колеса рассчитаны значения всех рассмотренных выше моментов, а также построены 3D-графики результирующего момента в функции от скорости и угла поворота с учетом всех составляющих и с учетом только существенных составляющих (M_{ω} , M_{cy} , M_{cz}) для двух режимов движения автомобиля (роста угла поворота, возвращения управляемых колес в среднее положение). Учитывая, что графики визуально не отличаются друг от друга, в работе представлен только график зависимости $M_p = f(v, \theta)$ с учетом M_{ω} , M_{cy} , M_{cz} (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1 Графики зависимости $M_p = f(v, \theta)$: а – по мере роста угла поворота; б – при возвращении управляемых колес в среднее положение

На рис. 2 представлен график зависимости относительной погрешности учета только существенных составляющих результирующего момента по мере роста угла поворота.

Ввиду того, что для случая возвращения управляемых колес в среднее положение оценка относительной погрешности не представляется возможной, был проведен анализ абсолютной погрешности. График зависимости абсолютной погрешности учета только существенных составляющих результирующего момента для этого случая представлен на рис. 3.

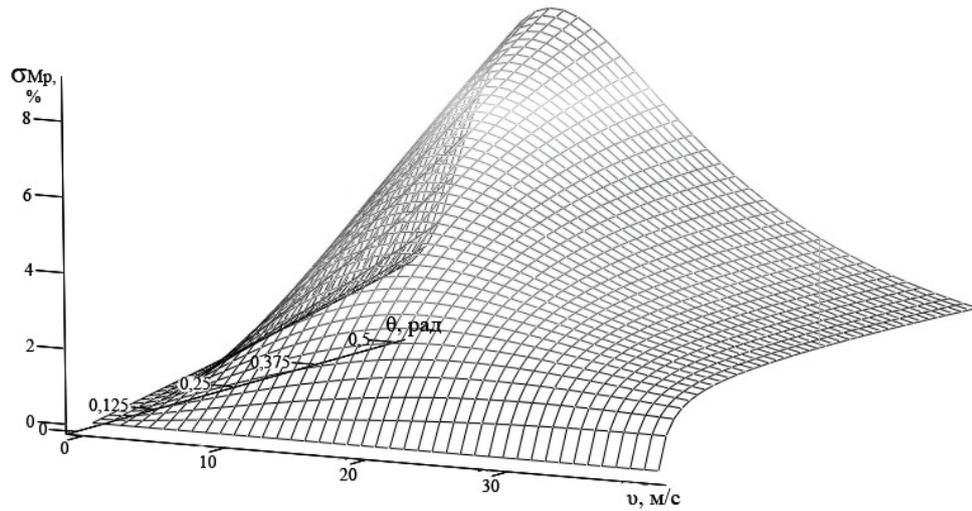


Рис. 2 График зависимости относительной погрешности учета только существенных составляющих результирующего момента

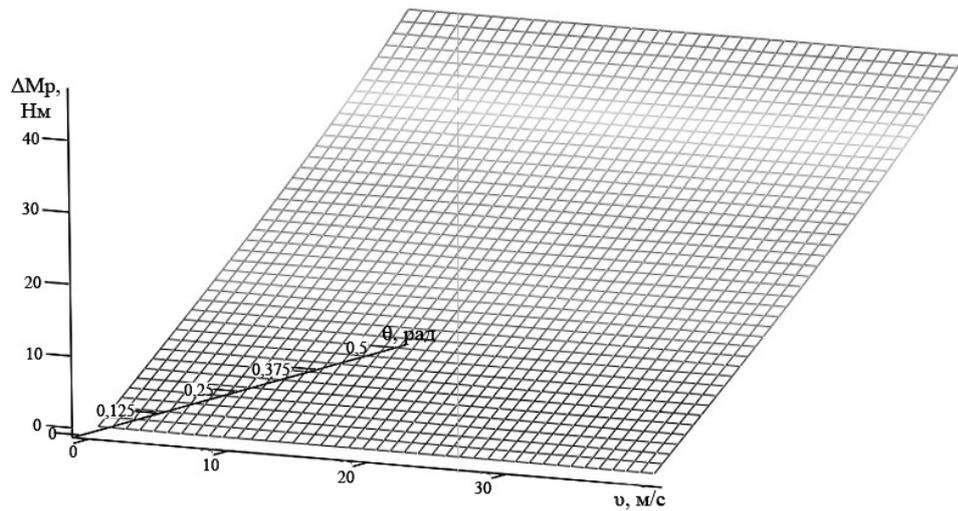


Рис. 3 График зависимости абсолютной погрешности учета только существенных составляющих результирующего момента

Как видно из рис. 2, разница не превышает 10 %, поэтому при имитации усилия на рулевом колесе автомобильного тренажера целесообразно учитывать только выбранные существенные составляющие результирующего момента сопротивления повороту управляемых колес.

Полученные результаты могут быть использованы и при имитации рулевого управления с усилителем руля, поскольку моменты сопротивления (M_o , M_{cy} , M_{cz} , $M_{шп}$, M_B , M_R), действующие на управляемые колеса, а следовательно, и на рулевое управление, не изменятся. Усилитель будет только снижать значение результирующего момента. Изменяя значение этого ослабляющего момента, можно имитировать рулевое управление с различными типами усилителей руля.

Это даст обучаемому возможность прочувствовать управление автомобилем в вариантах от автомобиля без усилителя руля до автомобиля с «пустым рулем» (момент, создаваемый усилителем, равен моменту сопротивления).

Расчеты показывают, что максимальный момент сопротивления для легкового автомобиля среднего класса, который должен развивать электродвигатель, составляет ~140 Нм.

2 Динамические свойства электрического привода рулевого колеса тренажера

Момент сопротивления зависит от скорости движения автомобиля и угла поворота управляемых колес. Таким образом, скорость изменения момента будет зависеть от скорости изменения угла поворота управляемых колес и ускорения автомобиля. Водитель поворачивает руль до упора примерно за 4 с, в экстремальных ситуациях это время меньше, а в большинстве случаев динамика более медленная. Если считать, что за эти 4 с момент изменяется от нуля до максимума, то средняя скорость изменения момента будет 35 Нм/с. Автомобиль ВАЗ-2110 в базовой конфигурации разгоняется до 100 км/ч за 12 с, таким образом, его среднее ускорение в этот период времени составляет 2,3 м/с². В результате скорость изменения момента для этого случая будет составлять 6,4 Нм/с. Следует отметить, что максимальное значение скоростного момента сопротивления развивается при максимальной скорости и максимальном угле поворота управляемых колес, т.е. в ситуации, которая практически возникнуть не может.

В результате такого приближенного расчета можно выдвинуть требования по динамике изменения момента. Электродвигатель должен поддерживать скорость изменения момента в 40 Нм/с (с запасом).

Следует отметить возможность применения редуктора, понижающего требования к моменту электродвигателя, т.к. не предъявляются высокие требования к его частоте вращения. Это позволит не только снизить мощность электродвигателя, но и существенно уменьшить его массогабаритные параметры. Например, при использовании понижающего редуктора с передаточным отношением, равным 12, максимальный момент составит 11,7 Нм, а скорость изменения момента – 3,3 Нм/с. Для привода рулевого управления целесообразно использовать планетарный редуктор, т.к. он обладает меньшими габаритами и массой, кроме того, планетарные передачи работают с меньшим шумом, чем простые, что связано с повышенной плавностью внутреннего зацепления, меньшими размерами колес, замыканием сил в механизме и передачей меньших сил на корпус.

Возможны различные реализации электропривода рулевого управления КАТ, обусловленные наличием разного вида электрических машин (постоянного тока, асинхронные, синхронные).

Двигателям постоянного тока присущи серьезные недостатки, обусловленные, главным образом, наличием щеточно-коллекторного аппарата:

1. Недостаточная надежность коллекторного аппарата, необходимость его периодического обслуживания.

2. Ограниченные величины напряжения на якоре и, следовательно, мощности двигателей постоянного тока, что ограничивает их применение для высокоскоростных приводов большой мощности.

3. Ограниченная перегрузочная способность двигателей постоянного тока, ограничение темпа изменения тока якоря, что существенно для высокодинамичных электроприводов.

Асинхронный двигатель является наиболее массовым электрическим двигателем. Эти двигатели выпускаются мощностью от 0,1 кВт до нескольких тысяч киловатт и находят применение во всех отраслях хозяйства. Основными достоинствами асинхронного двигателя являются простота его конструкции и невысокая стоимость.

Ветвь синхронных электрических машин наиболее перспективна и в ближайшее время сулит существенный технологический скачок. Такой скачок уже произошел в информационной части электромеханической системы (микропроцессоры, микроконтроллеры, программируемые логические интегральные схемы), и в силовой полупроводниковой части электромеханической системы (интеллектуальные, интегральные модули, силовые элементы с новой технологией изготовления).

В электромеханике такой скачок, повторим, можно ожидать на пути развития синхронных систем, тогда как ветви, связанные с машинами постоянного тока и асинхронными машинами, следует признать устоявшимися, не сулящими новых технологических прорывов.

Уже сегодня имеются разработки бесконтактных синхронных машин, обладающих улучшенными на порядок массогабаритными показателями. Эти машины имеют совершенно новую нетрадиционную конструкцию и очень широкие возможности.

На рис. 4 изображена структурная схема классической трехконтурной системы регулирования.

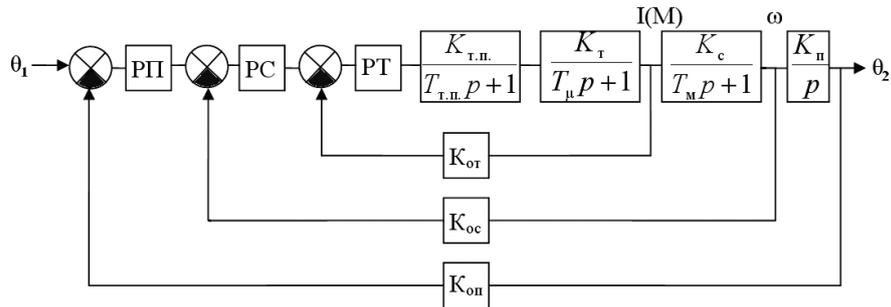


Рис. 4 Структурная схема трехконтурной системы регулирования

На рис. 4: $K_{т.п.}$ – коэффициент передачи транзисторного преобразователя (ШИМ-инвертор); $K_{т.}$ – коэффициент передачи тока; $K_{с.}$ – коэффициент передачи скорости; $K_{п.}$ – коэффициент передачи положения; $T_{т.п.}$ – постоянная времени транзисторного преобразователя; T_{μ} – электромагнитная постоянная времени; $T_{м}$ – электромеханическая постоянная времени; $K_{ос.}$, $K_{оп.}$ – коэффициенты обратной связи по скорости и положению соответственно.

Зная номинальное напряжение питания электродвигателя $U_{н}$ и уровень напряжения U_1 логической единицы сигнала, выдаваемого ЭВМ, можно определить коэффициент передачи транзисторного преобразователя:

$$K_{т.п.} = \frac{U_{н}}{U_1}.$$

Номинальный ток электродвигателя определяем из следующего соотношения:

$$I_H = \frac{M_H \omega_H}{U_H}.$$

Теперь можно определить коэффициент передачи тока:

$$K_T = \frac{I_H}{U_H} \text{ (1/Ом)},$$

и коэффициент передачи скорости:

$$K_c = \frac{\omega_H}{I_H} \text{ (1/(А·с))}.$$

С учетом того, что отсчет положения будем вести относительно вала электродвигателя, принимаем $K_n = 1$.

Постоянную времени транзисторного преобразователя можно принять равной периоду несущего ШИМ-сигнала $T_{т.п}$. Значения электромагнитной и электромеханической постоянных времени определены паспортными данными электродвигателя T_μ , T_M .

Регулирование момента (тока) создаваемого электропривода КАТ будет осуществляться автоматически при помощи ЭВМ и ШИМ-инвертора, поэтому в схеме на рис. 4 контур регулирования тока заменим одним звеном, тогда получится схема, представленная на рис. 5.

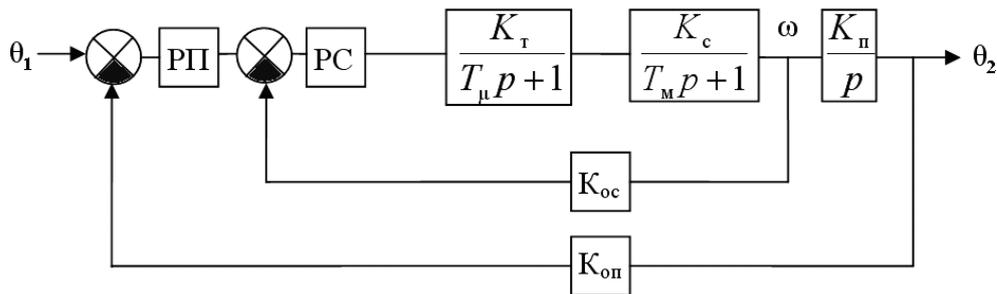


Рис. 5 Структурная схема двухконтурной системы регулирования

Так как требуется компенсация одной постоянной времени (T_M), то очевидно, что регулятор скорости будет представлять собой ПИ-регулятор, передаточная функция которого будет следующей:

$$W_{pc} = \frac{1 + T_M p}{T_{ис} p} = \frac{1}{T_{ис} p} + \frac{T_M}{T_{ис}}.$$

Передаточная функция разомкнутой системы в данном случае будет определяться выражением

$$W_{p1} = \frac{K_T K_c}{T_{ис} p (T_\mu p + 1)}.$$

Тогда передаточная функция замкнутой системы будет определяться выражением

$$W_{31} = \frac{\frac{1}{K_{oc}}}{\frac{T_{ис}}{K_T K_c K_{oc}} p(T_\mu p + 1) + 1}.$$

Поскольку

$$\frac{T_{ис}}{K_T K_c K_{oc}} = T_0 = a_c T_\mu,$$

то

$$T_{ис} = K_T K_c K_{oc} a_c T_\mu.$$

Теперь свернем контур регулирования скорости, заменив его одним блоком, тогда двухконтурная схема преобразуется к виду, представленному на рис. 6.

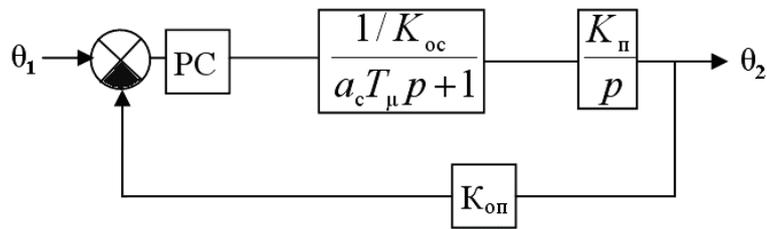


Рис. 6 Структурная схема одноконтурной системы регулирования

В данном случае регулятор положения будет представлять собой П-регулятор с коэффициентом пропорциональности $K_{р.п}$.

Передаточная функция разомкнутой системы в данном случае будет следующей:

$$W_{p2} = \frac{K_{р.п} K_\pi \cdot \frac{1}{K_{oc}}}{p(a_c T_\mu p + 1)}.$$

Тогда передаточная функция замкнутой системы описывается выражением

$$W_{32} = \frac{K_{р.п} K_\pi \cdot \frac{1}{K_{oc}}}{p(a_c T_\mu p + 1) + \frac{K_{р.п} K_\pi}{K_{oc}} \cdot K_{оп}} = \frac{\frac{1}{K_{оп}}}{\frac{K_{oc}}{K_{р.п} K_\pi K_{оп}} p(a_c T_\mu p + 1) + 1}.$$

Так как $\frac{K_{oc}}{K_{р.п} K_\pi K_{оп}} = a_\pi a_c T_\mu$, то $K_{р.п} = \frac{K_{oc}}{K_\pi K_{оп} a_\pi a_c T_\mu}$.

При настройке на технический оптимум ($a_\pi = a_c = 2$) для коэффициентов обратных связей, равных единице ($K_{оп} = K_{oc} = 1$), рассчитаем передаточные функции регуляторов скорости и положения:

$$W_{pc} = \frac{1}{K_T K_c K_{oc} a_c T_\mu p} + \frac{T_m}{K_T K_c K_{oc} a_c T_\mu} = \frac{255}{p} + 0,638,$$

$$W_{pp} = K_{p,п} = \frac{K_{oc}}{K_\pi K_{оп} a_\pi a_c T_\mu} = 100.$$

Расчет передаточных функций (параметров ПИ-регуляторов) для электропривода на основе асинхронного двигателя можно выполнить аналогично.

На рис. 7 представлена виртуальная модель электропривода рулевого управления КАТ на основе синхронной электрической машины, выполненная в программной среде Simulink.

На модели (рис. 7) PI reg1 выполняет функции регулятора положения; PI reg2 выполняет функции регулятора скорости; dq2abc – преобразователь координат; PWM inv. – ШИМ-инвертор; Permanent Magnet Synchronous Machine – электродвигатель 2ДБМ140-2,5-0,5-3; Subsystem – блок расчета результирующего момента сопротивления на руле в зависимости от угла поворота и скорости движения автомобиля; Ramp задает линейно изменяющееся значение угла поворота ротора электродвигателя (в рад); Step задает скачкообразное изменение угла поворота ротора электродвигателя для исследования переходного процесса электропривода.

На рис. 8 представлена виртуальная модель электропривода рулевого управления КАТ на основе асинхронной электрической машины, выполненная в программной среде Simulink.

На модели (рис. 8) PI reg выполняет функции регулятора положения; IGBT Inverter – трехфазный автономный инвертор на IGBT-транзисторах; Current Regulator – гистерезисный трехфазный регулятор тока; ABC-DQ и DQ-ABC осуществляют преобразование неподвижной трехфазной системы координат во вращающуюся двухфазную и вращающейся двухфазной в неподвижную трехфазную; Teta Calculation – блок определения выходной частоты инвертора; Flux Calculation – блок вычисления потока; Speed_controller – регулятор скорости; Asynchronous Machine – виртуальный асинхронный двигатель; Subsystem – блок расчета результирующего момента сопротивления на руле в зависимости от угла поворота и скорости движения автомобиля; Ramp задает линейно изменяющееся значение угла поворота ротора электродвигателя (в рад); Step задает скачкообразное изменение угла поворота ротора электродвигателя для исследования переходного процесса электропривода.

Результаты моделирования двух вариантов реализации электропривода рулевого управления КАТ представлены на рис. 9–13 (а – результаты моделирования синхронного электропривода, б – результаты моделирования асинхронного электропривода).

В рисунках на верхних осциллограммах представлен график расчетного момента, на вторых – график момента электродвигателя, на третьих – график линейного напряжения на выходе автономного инвертора, на четвертых – график токов обмотки электродвигателя, на пятых – график угловой скорости вращения вала ротора электродвигателя.

На рис. 9 представлены результаты моделирования при заданных скорости движения автомобиля 72 км/ч (минимальное значение предельной скорости выполнения маневра согласно РД 37.001.005-86) и угле поворота рулевого колеса 60°.

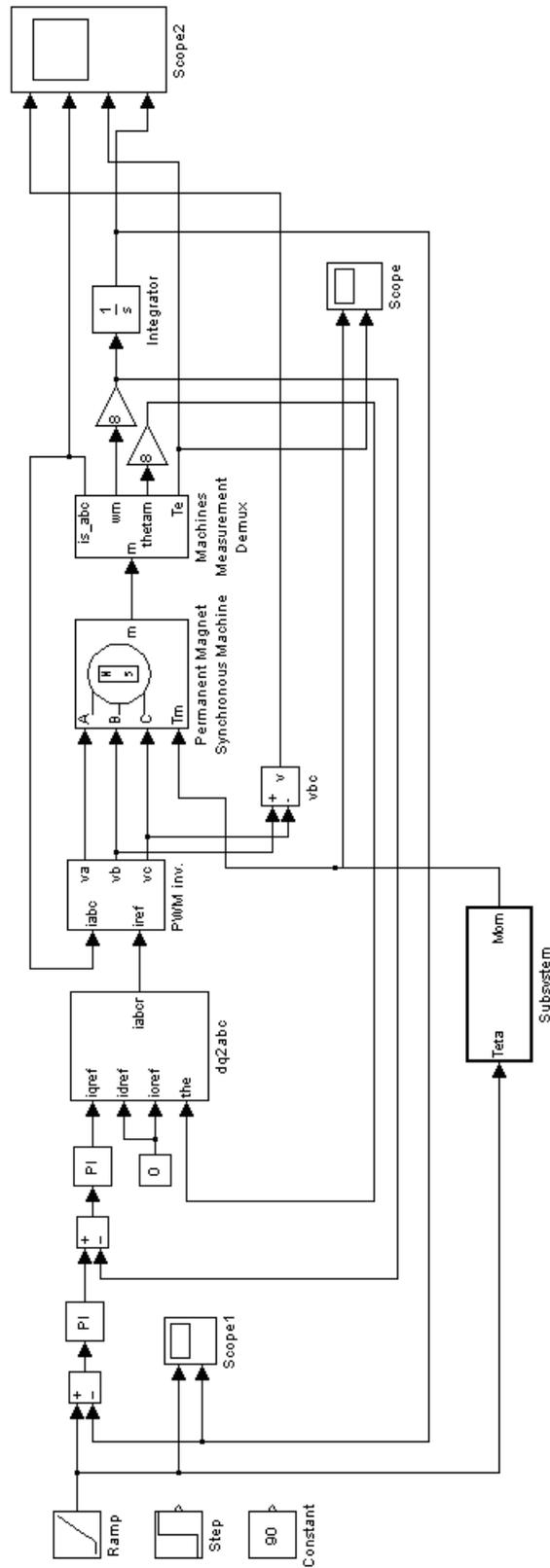


Рис. 7 Модель электропривода рулевого управления КАТ на базе синхронной электрической машины

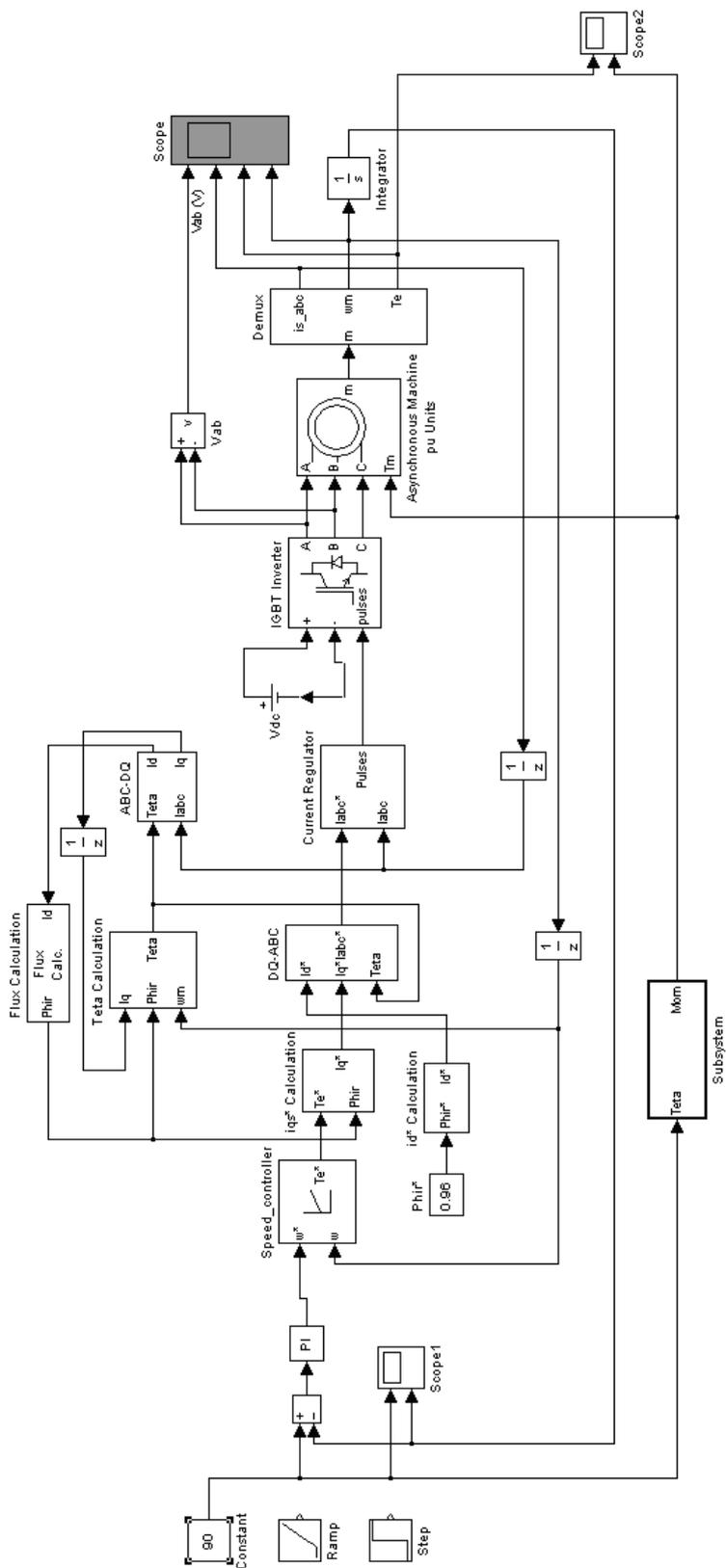
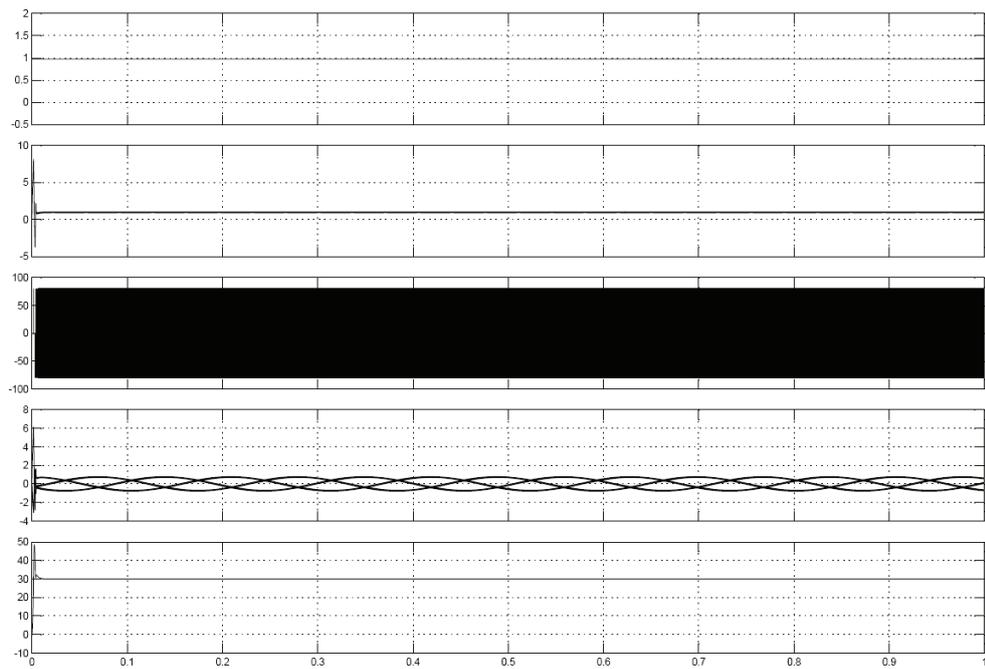
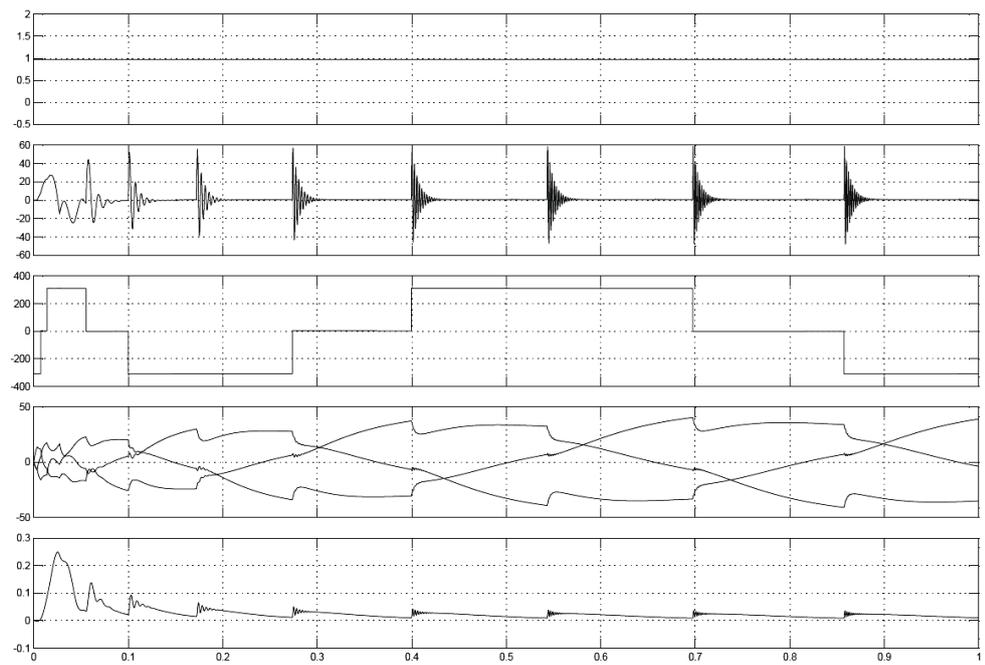


Рис. 8 Модель электропривода рулевого управления КАТ на базе асинхронной электрической машины



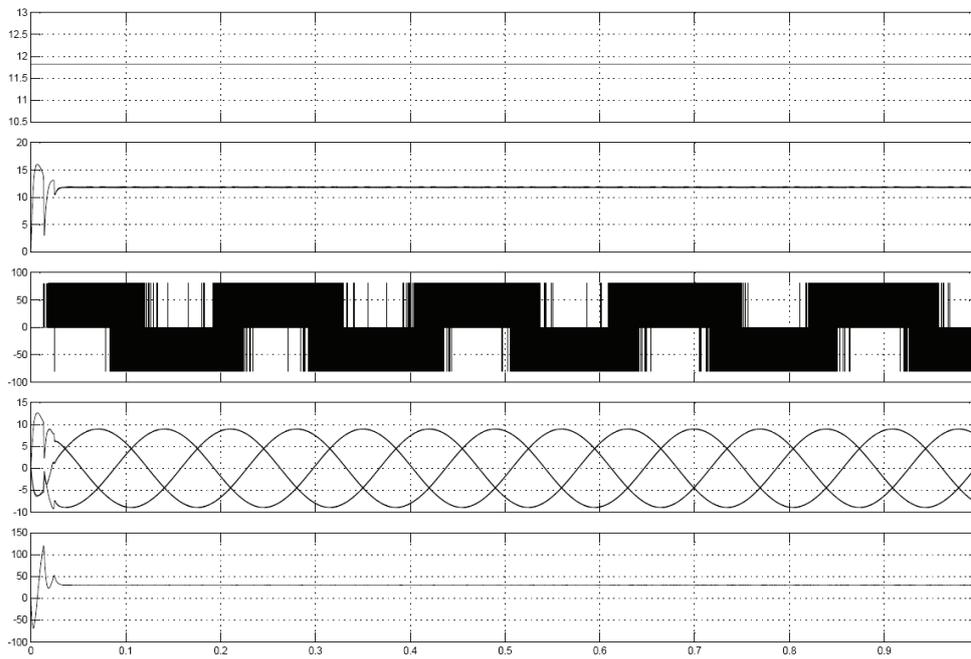
а)



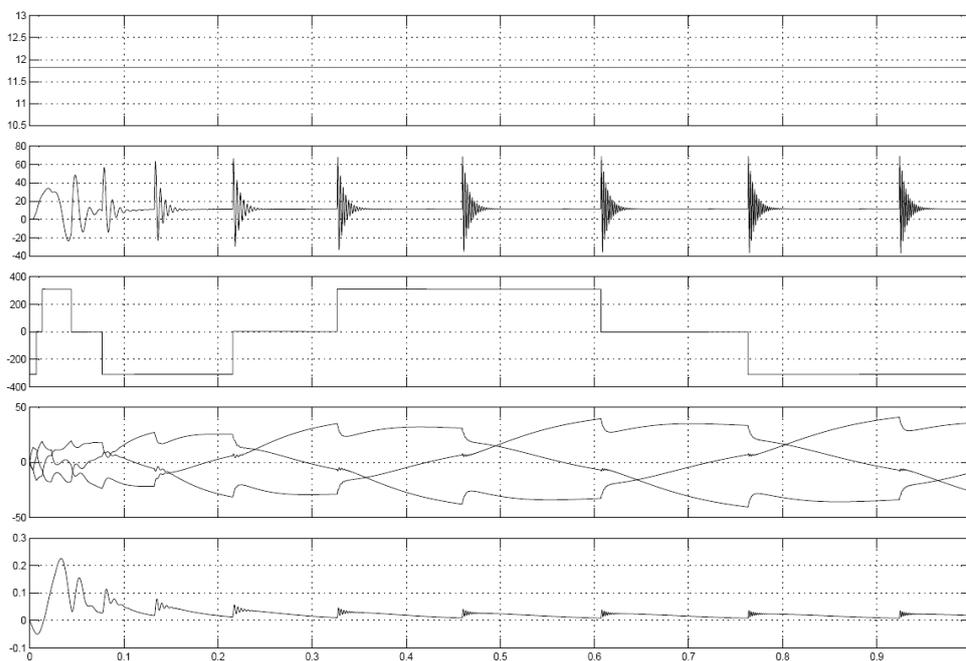
б)

Рис. 9 Результаты моделирования при скорости автомобиля 72 км/ч и угле поворота рулевого колеса 60°

На рис. 10 представлены результаты моделирования при заданных скорости движения автомобиля 0 км/ч (при данной скорости создается максимальный момент сопротивления) и угле поворота рулевого колеса 60°.



а)



б)

Рис. 10 Результаты моделирования при скорости автомобиля 0 км/ч и угле поворота рулевого колеса 60°

На рис. 11 представлены результаты моделирования при заданных скорости движения автомобиля 72 км/ч и линейном изменении угла поворота рулевого колеса от 0 до 360°.

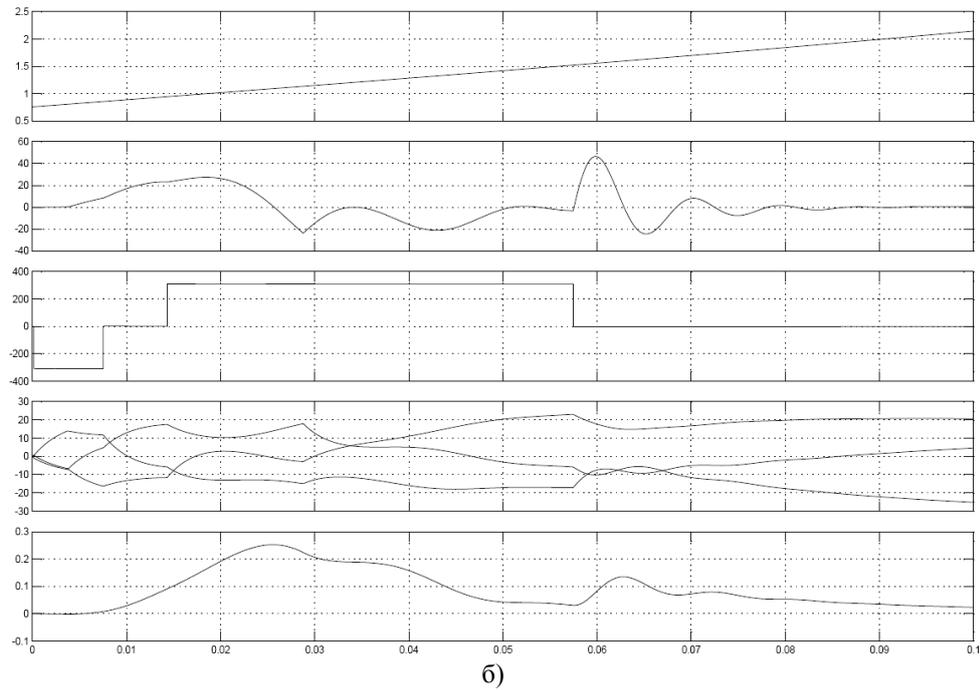
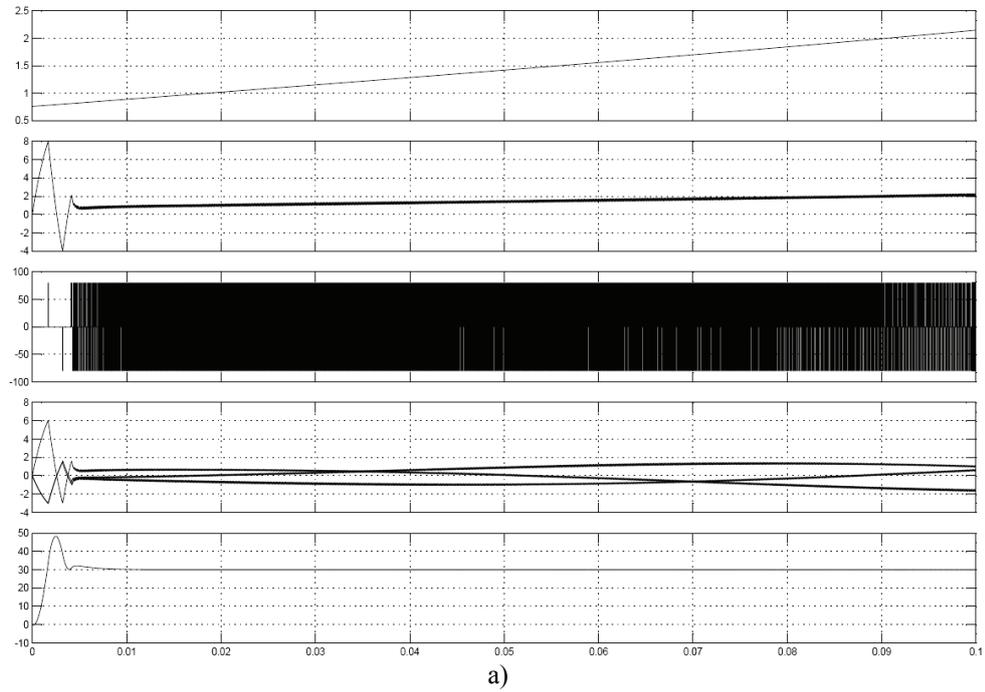


Рис. 11 Результаты моделирования при скорости автомобиля 72 км/ч и изменении угла поворота рулевого колеса от 0 до 360°

На рис. 12 представлены результаты моделирования при заданных скорости движения автомобиля 0 км/ч и линейном изменении угла поворота рулевого колеса от 0 до 360°.

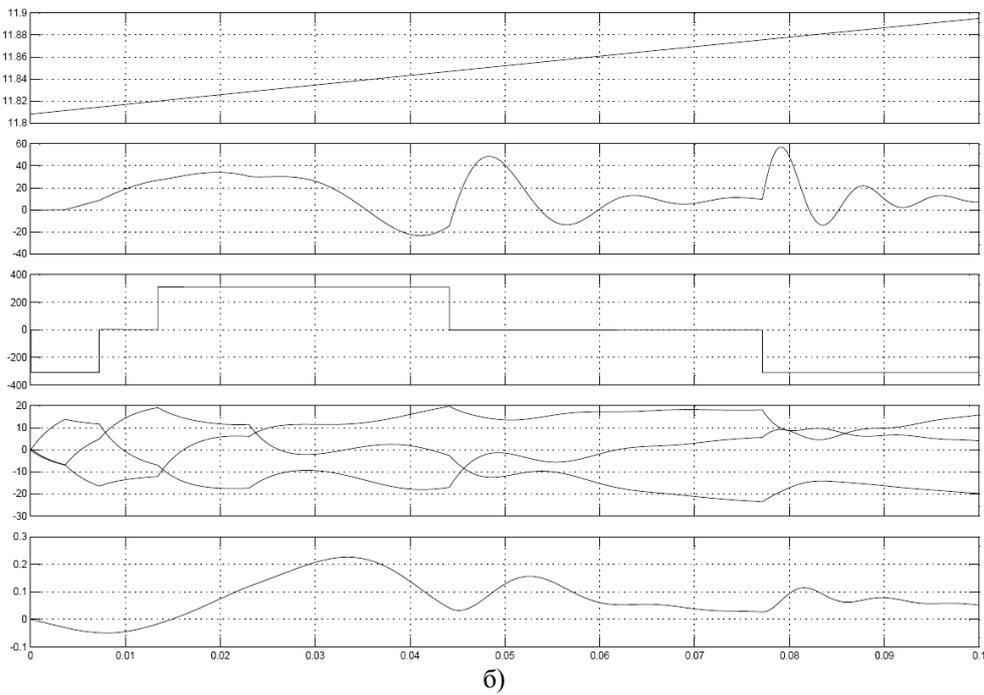
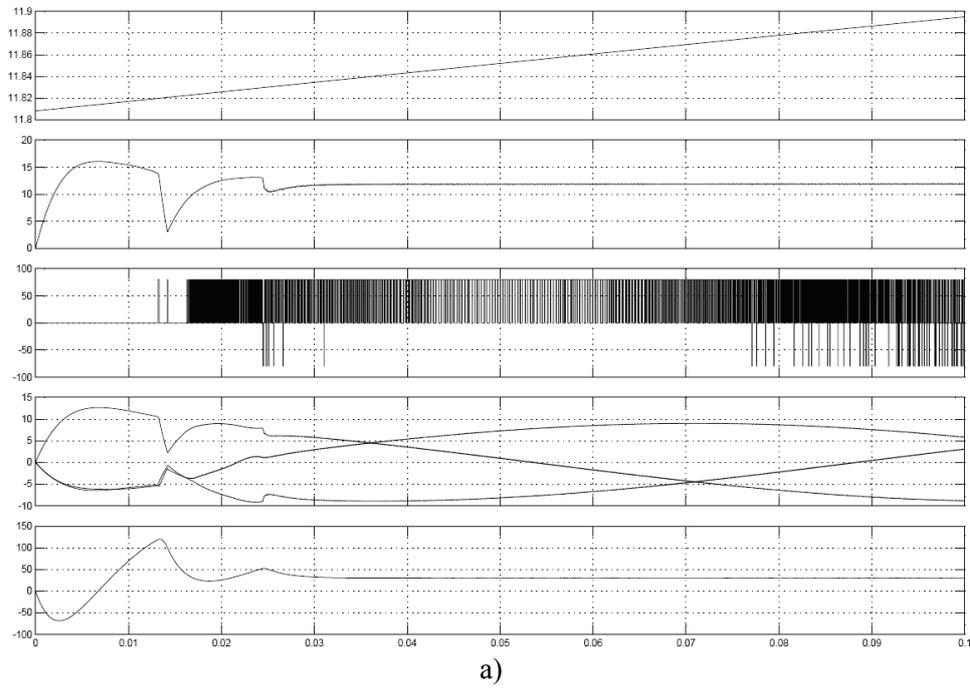


Рис. 12 Результаты моделирования при скорости автомобиля 0 км/ч и изменении угла поворота рулевого колеса от 0 до 360°.

Для исследования переходного процесса привода на вход схемы подавался случайный сигнал при помощи блока Band-Limited White Noise. На рис. 13 представлены результаты моделирования.

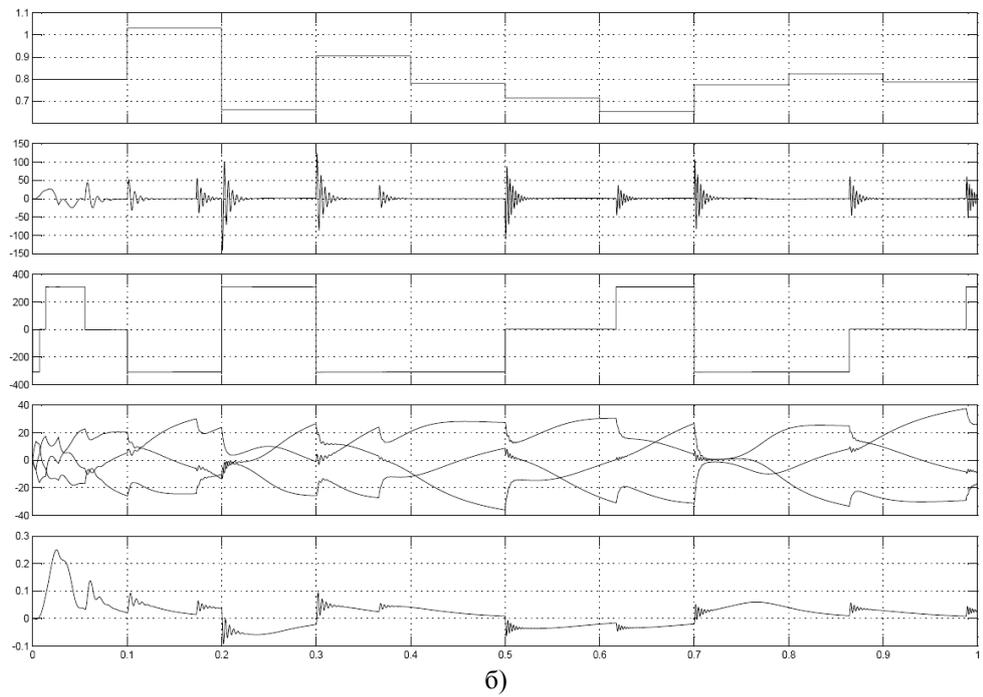
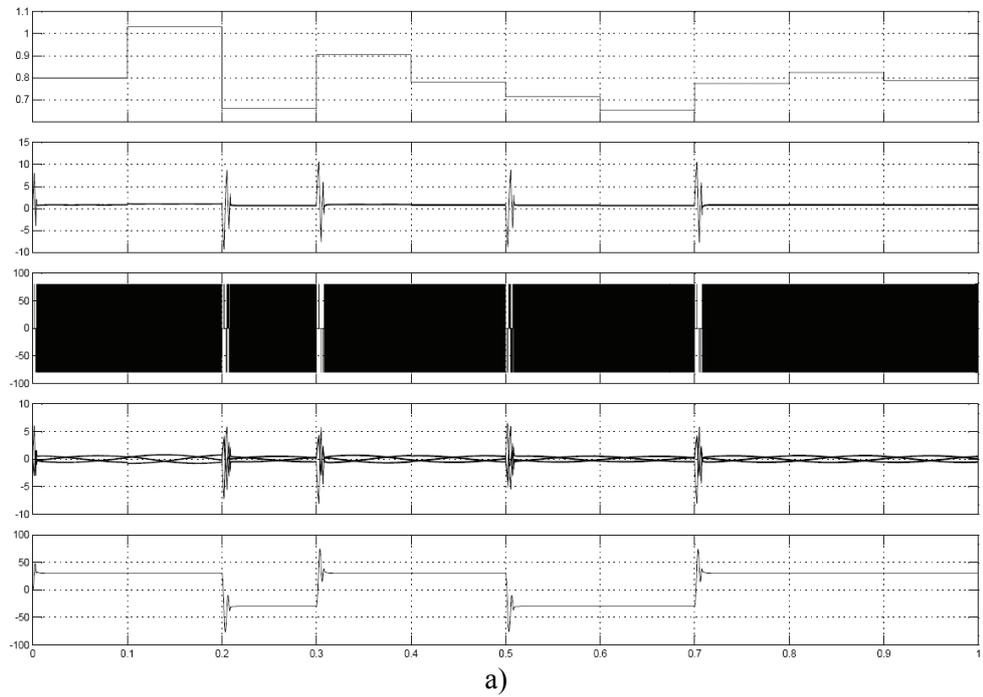


Рис. 13 Результаты моделирования при случайных входных воздействиях

Выводы

1. Математическая модель рулевого управления КАТ с учетом только значимых составляющих механических моментов достаточно точно позволяет имитировать усилия на рулевом колесе.

2. Использование электропривода на основе синхронной электрической машины для рулевого управления КАТ более целесообразно, т.к. он обладает большим быстродействием, меньшей величиной пульсаций момента, а также требуется двигатель меньшей номинальной мощности, чем в электроприводе на основе асинхронной электрической машины.

Список литературы

1. **Савельев, А. М.** Комплексный автомобильный тренажер / А. М. Савельев, К. А. Сухов // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии : труды II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Тольятти : ТГУ, 2007. – 2 ч. – С. 108–112.
2. **Литвинов, А. С.** Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств : учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» / А. С. Литвинов, Я. Е. Фаробин. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.
3. **Уханов, А. П.** Теория автомобиля в упражнениях и задачах : учебное пособие для вузов / А. П. Уханов, И. И. Артемов, О. Ф. Пшеничный ; под общ. ред. А. П. Уханова. – Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ, 2002. – 278 с.