

Комбинированная электроустановка (КЭУ) гибридного автомобиля в общем случае состоит из двигателя внутреннего сгорания, электрической машины, одного или нескольких накопителей энергии и вентильных преобразователей. Разработка таких КЭУ требует проведения большого количества исследований не только на экспериментальной установке, но и, в первую очередь, на математической модели, положенной в основу компьютерного моделирования. Построение математической модели работы асинхронной машины КЭУ в стартерном режиме рассмотрено в [1]. В данной статье рассматривается построение математической модели механической части КЭУ. Математическое описание процессов электромеханического преобразования энергии в АМ с вентильным преобразователем отличается известной сложностью. Трудности математического моделирования связаны, с одной стороны, с относительной сложностью уравнений электрической машины, с другой, - со свойствами дискретности и неполной управляемости вентильных преобразователей [2]. Основными задачами исследования динамических режимов КЭУ являются: определение токов, напряжений и электромагнитных моментов при протекании электромагнитных переходных процессов в интервал наибольшей загрузки вентильных элементов, а также определение динамики разгона ДВС при стартерном запуске. При решении первой задачи целесообразно применить метод мгновенных значений с возможно более точным учетом всех элементов преобразования электроэнергии. Для решения второй также желательно учесть дискретные составляющие воздействий, что позволит повысить точность расчета электромеханических переходных процессов. Возможен расчет переходных процессов в АМ КЭУ по уравнениям в неподвижных относительно статора осях координат для расчета квазистационарных процессов. При широтном регулировании напряжения статора асинхронной машины удобно записывать уравнения АМ в координатах, вращающихся с частотой первой гармонической напряжения фаз статора АМ [3]. Уравнения электрического равновесия машины в этих осях запишем в форме: , где u , v - оси, вращающиеся с частотой ω_1 ; L_{su} , L_{sv} , L_{ru} , L_{rv} - полные индуктивности обмоток статора и ротора по осям u и v . Уравнение механического равновесия: где p - число пар полюсов АМ; J - момент инерции ротора АМ и коленчатого вала ДВС; ω_{kv} - механическая частота вращения коленчатого вала ДВС. При составлении математической модели КЭУ необходимо учесть насыщение магнитной цепи асинхронной машины. Обычно эффект насыщения учитывают приближенно выбором индуктивностей, соответствующих насыщенному состоянию машины [4, 5], или ведением функции насыщения [4, 6]. Последний подход более точен, т.к. позволяет учесть зависимость индуктивностей машины от результирующего магнитного потока. Именно этот подход используем для учета насыщения магнитной цепи КЭУ. В уравнение механического равновесия входит момент ДВС (M_{kv}), который изменяется в зависимости от положения коленчатого вала.

Наблюдаются неравномерности (пульсации) частоты вращения вала как при запуске ДВС, так и при вращении колес автомобиля. Это обусловлено тормозными моментами, связанными со сжатием газа в цилиндрах ДВС. Чем больше момент инерции системы «стартер - ДВС», тем меньше пульсации частоты вращения, тем легче проходит ДВС при запуске через верхнюю «мертвую» точку. Момент инерции в системах с обычными стартерами постоянного тока достигают 1 кг·м². Это приводит к тому, что пусковая частота вращения в таких системах составляет 100 - 200 мин⁻¹, а сопровождение стартером работающего ДВС до 150 - 200 мин⁻¹. При прямом пуске ДВС от АМ КЭУ, когда электрическая машина установлена непосредственно на коленчатом валу, момент инерции системы уменьшается в 4-5 раз [7]. Поэтому для прохождения «мертвой» точки необходима большая мощность аккумуляторной батареи. В начале запуска, когда система зажигания ДВС не работает, тормозной момент на валу АМ, создаваемый ДВС, возрастает с ростом давления в цилиндрах двигателя, а затем, при прохождении «мертвой» точки, резко уменьшается. Такое изменение тормозного момента можно аппроксимировать кусочно-гармонической функцией, зависящей от угла поворота коленчатого вала ДВС. Интервал повторения этой функции зависит от числа цилиндров ДВС. При моделировании процесса изменения тормозного момента на валу АМ в [7, 8] вводится специальная функция, зависящая от числа цилиндров ДВС. Она определяет диапазон углов поворота коленчатого вала, в котором происходит плавное нарастание тормозного момента на валу АМ: $\theta_{\text{нц}} \leq \theta \leq \theta_{\text{кц}}$, где $N_{\text{ц}}$ - число цилиндров ДВС. В работе [7] эта функция представлена для четырехцилиндрового ДВС. Запишем эту функцию для общего случая: $M_{\text{тк}} \sin\left(\frac{2\pi}{\theta_{\text{кц}} - \theta_{\text{нц}}}(\theta - \theta_{\text{нц}})\right)$. Здесь θ - текущий угол поворота коленчатого вала; $r_{\text{п}}$ - число пар полюсов АМ; $t_{\text{к}}$ - конечное время расчета; $\omega_{\text{кв}}$ - частота вращения коленчатого вала; $\theta_{\text{нц}}$ - начальный угол поворота коленчатого вала. В частном случае, при работе АМ КЭУ с четырехцилиндровым ДВС, изменение тормозного момента будет повторяться через половину оборота коленчатого вала. Как показано в [7], если $F_{\text{ц}} > 0$, то изменение тормозного момента $M_{\text{кв}}$ на валу АМ, создаваемое ДВС, можно описать уравнением: на интервале повторяемости $\theta_{\text{нц}} \leq \theta \leq \theta_{\text{кц}}$, где $M_{\text{тм}}$ максимум тормозного момента ДВС. Если $F_{\text{ц}} \leq 0$, можно использовать в модели следующее уравнение: $M_{\text{тк}} \sin\left(\frac{2\pi}{\theta_{\text{кц}} - \theta_{\text{нц}}}(\theta - \theta_{\text{нц}})\right)$. Неравномерность вращения коленчатого вала ДВС необходимо учитывать не только в процессе запуска ДВС от асинхронной машины КЭУ, но и в генераторном режиме работы ДВС. Расчетные осциллограммы процесса запуска ДВС от АМ КЭУ с учетом неравномерности вращения коленчатого вала представлены на рис.1, а-б. Номинальная мощность АМ - 4 кВт, номинальное напряжение емкостного накопителя энергии - 42В. На расчетных осциллограммах введены следующие обозначения: n - частота вращения вала асинхронной машины. Т.к. асинхронная машина КЭУ установлена непосредственно на коленчатый вал ДВС, следовательно, n можно рассматривать также и как частоту вращения

коленчатого вала ДВС. Анализ изменения этой переменной позволяет оценить, как быстро асинхронная машина КЭУ способна запустить ДВС; M - электромагнитный момент асинхронной машины. Эта переменная необходима для оценки пусковых свойств АМ. Для гарантированного запуска ДВС значение этой величины не может быть менее 150 Нм. Для стабильной работы ДВС до перехода КЭУ в генераторный режим работы в диапазоне 200 - 1000 об/мин электромагнитный момент должен быть не менее 100 - 30 Нм; $M_{кв}$ - тормозной момент коленчатого вала ДВС. Изменением этой величины относительно номинального значения можно моделировать холодный запуск (запуск ДВС при низких температурах окружающей среды (до -300С и менее), когда тормозной момент ДВС большой и требуется значительный пусковой момент АМ), и горячий запуск (при температуре >250С); f_2 - частота тока ротора. Для ускорения процесса запуска ДВС, а также для предохранения АМ и ВП от перегрузок необходимо ограничить абсолютное скольжение и поддерживать его близким к критическому значению; u_d - напряжение на входе вентильного преобразователя частоты КЭУ. Если напряжение достигает номинального уровня, его ограничивают на этом уровне. При моделировании это регулирование напряжения производилось изменением напряжения на шинах постоянного тока КЭУ. Такое изменение практически эквивалентно регулированию фазного напряжения АМ с помощью ШИР или ШИМ вентильного преобразователя, подключенного к статору АМ; i_d - разрядный ток ЕНЭ. Изменение данной переменной позволяет оценить величину тока, протекающего через вентили преобразователя, и по нему выбрать полупроводниковые элементы. Осциллограммы иллюстрируют процесс холодного запуска ДВС. Такой запуск будем моделировать изменением тормозного момента ДВС, превышающим номинальное значение в 2,5 раза, т.е. $M_{ткв} = 150$ Нм. Расчетные осциллограммы показывают, что для запуска ДВС требуется большой пусковой момент АМ. Максимальное значение электромагнитного момента в начале процесса запуска достигает 210 Нм. а б Рис. 1 - Расчетные осциллограммы процесса запуска ДВС Коленчатый вал ДВС за 0,1 секунду достигает частоты вращения более 250 мин⁻¹. Наблюдается ярко выраженная неравномерность вращения коленчатого вала, это связано с увеличением тормозного момента ДВС. Из-за значительных пульсаций частоты вращения коленвала ДВС изменяется и частота питания АМ, так чтобы абсолютное скольжение и частота тока ротора АМ оставались постоянными. Из-за пульсаций частоты тока пульсирует и напряжение u_d , т.к. его регулирование происходит по закону постоянства отношения напряжения тока статора к его частоте. Максимальные мгновенные значения тока, потребляемого от ЕНЭ, достигают 420 А. В процессе разгона ДВС, среднее значение разрядного тока ЕНЭ находится на уровне 140 А. За 0,4 с асинхронная машина раскручивает коленчатый вал до частоты вращения 400 мин⁻¹.