

Е. В. Стрижакова, Н. И. Горбачевский

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТАРТЕРНОГО И ГЕНЕРАТОРНОГО РЕЖИМОВ РАБОТЫ
АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ
ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ**

Ключевые слова: математические модели, асинхронная машина, комбинированная электроустановка.

Исследованы математические модели стартерного и генераторного режимов работы асинхронной машины комбинированной электроустановки гибридного автомобиля. Математическая модель комбинированной электроустановки, для расчета электромеханических процессов, построенная на основе метода мгновенных значений, позволяет рассчитывать, мгновенные значения напряжений и токов статора асинхронной машины, мгновенные значения токов в звене постоянного тока комбинированной электроустановки, электромагнитный момент в стартерном или генераторном режимах.

Keywords: *mathematical model, the asynchronous machine, combined electrical installation.*

A mathematical model of the starter and generator modes asynchronous machine combined electrical hybrid car. Mathematical model of the combined electrical, electromechanical processes for calculating constructed on the basis of instantaneous values, allows to calculate the instantaneous values of voltages and currents of the stator of the asynchronous machine, the instantaneous values of the currents in the DC link of the combined electrical, electromagnetic torque in starter or generator mode.

Основными требованиями, предъявляемыми ко всем транспортным средствам, в том числе и к гибридным автомобилям, являются экологичность, экономичность, безопасность в работе и простота эксплуатации. Выполнение указанных требований при разработке и создании новых или совершенствовании уже существующих транспортных средств связано с анализом взаимосвязей и взаимодействий как отдельных элементов и узлов конструкции, так и эксплуатационных режимов работы, а также возможных управляющих воздействий и всевозможного разнообразия структурного построения.

Общезвестно, что проведение исследований, особенно на ранних стадиях проектирования, целесообразно проводить на математической модели [1]. Это связано с тем, что вычислительный эксперимент дешевле, проще, более легко управляем по сравнению с натурными испытаниями. Исследование на математической модели позволяет решать сложные комплексные проблемы, научно обосновывать принятие основополагающих и тактических решений при создании гибридного автомобиля, что, в свою очередь, позволяет значительно снизить вероятность появления ошибок и погрешностей.

Вместе с тем исследования на математической модели следует рассматривать как важную, но не единственную составляющую необходимых исследований, поскольку применимость результатов расчетов ограничена рамками принятых при ее разработке допущений. И только натурные испытания позволяют дать реальные результаты использования принимаемых при создании новых гибридных автомобилей решений. Поэтому только на разумном сочетании исследований на математической модели и натурных испытаний основывается рациональная организация и успех в работе по созданию новых и

совершенствованию уже существующих транспортных средств.

Рассматриваемая в данной статье комбинированная энергоустановка (КЭУ) состоит из бензинового двигателя, асинхронной машины (АМ), емкостного накопителя электроэнергии, аккумуляторной батареи и вентильных преобразователей [2]. Асинхронная машина в такой установке выполняет роль и стартера, и генератора.

При этом в стартерном режиме необходимо с достаточной степенью точности описать провода, соединяющие шины накопителей энергии с шинами вентильного преобразователя (ВП), и возможно точнее учесть внутреннее сопротивление ВП, складывающееся из сопротивления соединительных шин и сопротивлений транзисторных модулей. Необходимо учесть и сопротивление проводов, соединяющих выход вентильного преобразователя с фазами АМ.

Эквивалентная схема цепи постоянного тока КЭУ с учетом указанных факторов, а также учитывающая потери в стали АМ, показана на рис 1. Данная схема соответствует работе АМ от накопителя энергии в режиме стартера.

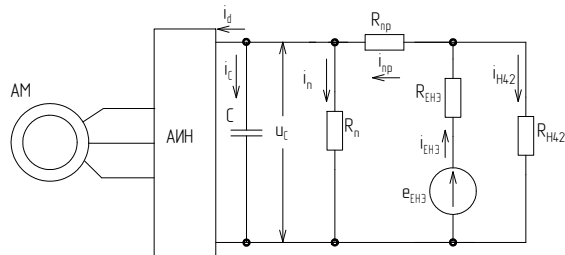


Рис. 1 – Эквивалентная схема цепи тока КЭУ

Уравнения цепи постоянного тока КЭУ, соответствующие этой эквивалентной схеме, запишутся:

$$i_{ЕНЭ} = \frac{e_{ЕНЭ} \left(1 + \frac{R_{ПР}}{R_{Н42}} \right) - u_C}{R_{ПР} + R_{ЕНЭ}},$$

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{i_{ЕНЭ} - i_d - i_H - i_{П}}{C},$$

$$i_H = \frac{e_{ЕНЭ} - i_{ЕНЭ} R_{ТЕЕН}}{R_H}$$

$$i_{П} = \frac{u_C}{R_{П}}.$$

Здесь $i_{ЕНЭ}$, i_d , $i_{Н42}$, $i_{П}$ – мгновенные значения токов емкостного накопителя энергии, входного тока инвертора, нагрузки бортовой сети 42В, ток потерь на коммутацию и в стали АМ;

$e_{ЕНЭ}$ – ЭДС емкостного накопителя энергии;

$R_{ПР}$, $R_{Н42}$, $R_{ЕНЭ}$, $R_{П}$ – активные сопротивления проводов, нагрузки 42В, емкостного накопителя энергии, потерь в стали;

u_C – напряжение на конденсаторе фильтра;

C – емкость конденсатора фильтра.

После преобразований, с учетом того, что $R_{ЕНЭ}$ и $R_{ПР}$ малы, а их произведение второго порядка малости и им можно пренебречь, для данной схемы уравнение в форме Коши:

$$0 = -C \frac{du_C}{dt} + e_{ЕНЭ} \left(\frac{1 + \frac{R_{ПР}}{R_H}}{R_{ПР} + R_H} - \frac{1}{R_H} \right) - u_C \left(\frac{1}{R_{ПР} + R_H} + \frac{1}{R_H} \right) - i_d.$$

Эквивалентное сопротивление $R_{П}$ учитывает потери на коммутацию в преобразователе и потери в стали АМ.

Т.к. в генераторном режиме ВП1 соединен с аккумуляторной батареей 12В через ВП3 (понижающий уровень выходного напряжения), то для составления схемы замещения при заряде аккумуляторной батареи удобно привести цепь аккумуляторной батареи к цепи с повышенным напряжением. Для этого используем коэффициент передачи по напряжению $K_{ВП3}$.

Учитывая требование баланса мощностей, приведенные значения токов, напряжений и активных сопротивлений находят по формулам:

$$i'_{ЗАБ} = \frac{i_{АБ}}{K_{ВП3}}, \dots E_{АБ} = K_{ВП3} E_{АБ1}, \dots R'_{АБ} = K_{ВП3}^2 R_{АБ},$$

$$i'_{Н14} = \frac{i_{Н14}}{K_{ВП3}}, \dots R'_{Н14} = K_{ВП3}^2 R_{Н14}.$$

Эквивалентная схема при работе КЭУ в генераторном режиме показана на рис.2.

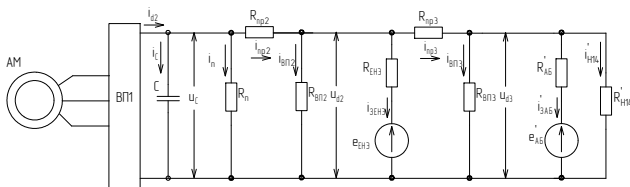


Рис. 2 – Эквивалентная схема при работе КЭУ в генераторном режиме

Здесь i_d , $i_{ЕНЭ}$, $i'_{ЗАБ}$, $i_{Н42}$, $i'_{Н14}$ – мгновенные значения токов вентильного преобразователя ВП1, зарядного тока емкостного накопителя энергии и приведенный зарядный ток аккумуляторной

батареи, нагрузки бортовой сети 42В и приведенной нагрузки бортовой сети 14В; $e'_{АБ}$ – приведенная ЭДС аккумуляторной батареи; $R_{ПР2}$, $R_{ПР3}$, $R_{Н42}$, $R'_{Н14}$, $R'_{АБ}$, $R_{ВП2}$, $R_{ВП3}$ – активные сопротивления проводов, соединяющих выход ВП1 с ВП2 и ВП3, нагрузки 42В и приведенное активное сопротивление нагрузки 14В, приведенное активное сопротивление аккумуляторной батареи, эквивалентные сопротивления, учитывающие потери в полупроводниковых элементах ВП2 и ВП3.

Уравнения цепи постоянного тока КЭУ, соответствующие этой эквивалентной схеме, запишутся:

$$i_{ЗЕНЭ} = -\frac{E_{ЕНЭ} + U_{д2}}{R_{ЕНЭ}};$$

$$U_{д2} = U_C - R_{ПР2} i_{ПР2} - i_{П} R_{П};$$

$$i'_{ЗАБ} = -\frac{E'_{АБ} + U_{д3}}{R'_{АБ}};$$

$$U_{д3} = U_C - R_{ПР3} i_{ПР3} - i_{П} R_{П}.$$

Математическая модель КЭУ для расчета электромеханических процессов, построенная на основе метода мгновенных значений, позволяет рассчитать мгновенные значения напряжений и токов статора АМ, мгновенные значения токов в звене постоянного тока КЭУ, электромагнитный момент в стартерном или генераторном режимах.

Расчет максимальных мгновенных значений токов инвертора важен для выбора силовых транзисторов, которые весьма чувствительны к перегрузкам по току и определения пульсаций электромагнитного момента и напряжений в звене постоянного тока, возникающих за счет переключений вентиля преобразователя.

Т.о., построены математические модели КЭУ в стартерном и генераторном режимах работы, учитывающие потери на коммутацию в преобразователе и потери в стали АМ, широтно-импульсное регулирование выходного напряжения АМ, заряд источников электропитания, а также зависимость тормозного момента ДВС от положения коленчатого вала.

Расчетные осциллограммы на рисунках 3 а, б иллюстрируют переход АМ из режима стартера в режим генератора при включении зажигания. Включение зажигания - это начало работы ДВС при подаче напряжения на свечи цилиндров.

Процесс включения в работу ДВС моделируется изменением знака среднего значения момента коленвала. Т.к. положительные значения соответствуют тормозному моменту ДВС, - отрицательные значения этого момента соответствуют вращающему моменту, возникающему под действием давления при воспламенении смеси в цилиндрах. В соответствии с математической моделью характер пульсаций момента считаем неизменным.

В современных автомобилях минимальная пусковая частота коленчатого вала карбюраторных двигателей, работающих на зимних сортах топлива, при $T = -20^{\circ}\text{C}$ составляет для 4-цилиндровых двигателей 70 об/мин [3, 4]. Однако на низких частотах вращения коленчатого вала происходит большое количество выбросов вредных веществ в

атмосферу. Следовательно, чем выше частота вращения коленчатого вала в момент зажигания, тем меньше выбросов происходит. Поэтому, для повышения экологичности автомобиля включение зажигания необходимо производить на частотах вращения, близких к частоте вращения холостого хода коленчатого вала ДВС.

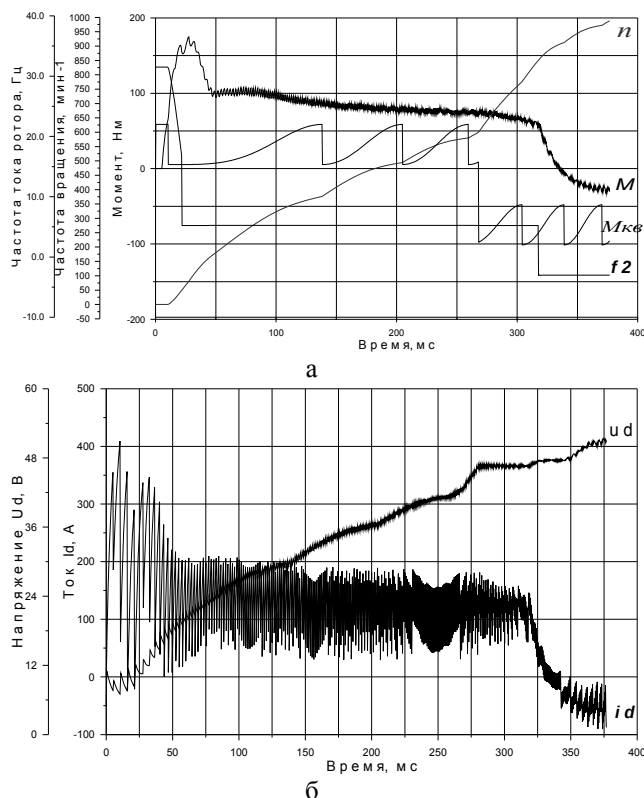


Рис. 3 – Осциллограммы работы ДВС. Здесь n – частота вращения вала асинхронной машины и коленчатого вала ДВС; M – электромагнитный момент асинхронной машины; M_{kv} – тормозной момент коленчатого вала ДВС; f_2 – частота тока ротора; u_d – напряжение на входе вентильного преобразователя частоты КЭУ; i_d – разрядный ток ЕНЭ

При достижении коленчатым валом скорости вращения близкой к холостому ходу - 600 об/мин происходит включение зажигания. Как видно из этой осциллограммы, скорость нарастания частоты вращения коленчатого вала увеличивается, и при частоте вращения холостого хода 800-850 об/мин (близкой к номинальной для ДВС автомобилей ВАЗ [5]) АМ входит в генераторный режим.

Среднее значение разрядного тока ЕНЭ 120 А. В момент времени 0,33с АМ из режима стартера переходит в режим генератора. Система управления устанавливает частоту тока статора АМ такой, чтобы частота поля АМ была меньше частоты вращения вала ДВС. Это достигается изменением знака заданного абсолютного скольжения. На осциллограмме это соответствует изменению знака частоты тока ротора, что соответствует изменению знака абсолютного скольжения. Ток i_d в звене постоянного тока преобразователя частоты становится зарядным, происходит заряд ЕНЭ. Среднее значение этого тока - 50А.

Литература

1. Преображенский Е.Б., Решетников А.Н. Исследование на математической модели работы стартер-генераторной установки. Труды Международной тринадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», Екатеринбург: УГТУ - УПИ, 2005. С.211-214.
2. Патент №2282301 Российской Федерации. МПК H02P 9/48, H02P 9/04, B60L 11/02, B60L 11/125, F02N 11/04. Энергетическая установка с асинхронным стартер-генератором / П.Ю. Грачев, Е.В. Ежова // 20. 08. 2006, Бюл. №23
3. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей: Учеб. Для студентов вузов. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Транспорт, 2000. 320 с.
4. Росс Твег. Системы зажигания легковых автомобилей. Устройство, обслуживание и ремонт. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2002. – 96 с., ил.
5. Руководство по эксплуатации автомобилей ВАЗ – 2110, ВАЗ – 2111, ВАЗ – 2112 и их модификаций. – Тольятти.: ДИС ОАО «АВТОВАЗ», 2003. 72 с.
6. Сорокин А.Г. Идентификация математической модели системы индукционного нагрева при производстве пластмассы методом литья [Текст]/Л.С. Зимин// Вестн. Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Техн. Науки. – 2012. Вып. №4(36) – с. 163-168
7. Сорокин А.Г. Система индукционного нагрева для производства пластмассы [Текст]/Л.С. Зимин// Вестн. Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Техн. Науки. – 2012. Вып. №1(33) – с. 223-227.
8. Сорокин А.Г., Горбачевский Н.И., Мифтахова Л.Х. Методы моделирования электромагнитных и тепловых полей системы индукционного нагрева для технологических комплексов производства пластмассы. – Вестник Казан. технол. ун-та, 2014, т.17, в.1 – с.111-114.
9. Козловский В.Н., Горбачевский Н.И., Сорокин А.Г., Кислинский В.Б., Мифтахова Л.Х. Аналитический комплекс прогнозирования надежности электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой. - Вестник Казан. технол. ун-та, 2014, т.17, в.3 – с.227-230.