

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ НА БАЗЕ АСИНХРОННЫХ МАШИН С АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

ГОЛУБЕВ А.Н., д-р техн. наук, БЫКОВ А.В., асп.

Приведена математическая модель дизель-электрической передачи на базе асинхронных машин, представлены результаты имитационного моделирования режима пуска при номинальной нагрузке.

*Ключевые слова:* имитационное моделирование, устройства с автономным источником энергии, кривые переходных процессов.

## MATHEMATICAL MODEL OF DIESEL-ELECTRICAL TRANSFER BASED ON ASYNCHRONOUS MACHINES WITH AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER

A.N. GOLUBEV, Doctor of Engineering, A.V. BYKOV, Post Graduate Student

The article is devoted to mathematical model of diesel-electrical transfer based on asynchronous machines. The results of start mode simulation during normal load are represented.

*Key words:* simulation, self-powered device, transient curves.

Машины с автономным источником энергии применяются во многих областях народного хозяйства и получили наибольшее распространение в строительстве, дорожном деле, лесотехнической, горнорудной, химической и нефтяной отраслях [1]. На сегодняшний день существуют установки с автономным источником энергии как на постоянном, так и на переменном токе. В качестве генератора электрической энергии чаще всего применяется синхронная электрическая машина. С появлением транзисторных ключей большой мощности расширились перспективы применения источников энергии с асинхронными генераторами. К техническим устройствам с автономным источником энергии предъявляются более жесткие требования по критериям надежности и экономичности, чем к устройствам, работающим от промышленной электрической сети. Из элементарных физических представлений следует, что наибольшее количество энергии в единицу времени любое техническое устройство потребляет в переходных динамических режимах работы [2]. Таким образом, для решения вопроса экономичности системы необходимо исследовать ее в динамике. Наиболее эффективным методом исследования сложных динамических систем является имитационное моделирование.

Для исследования дизель-электрической передачи методом имитационного моделирования необходимо составить ее математическую модель. Дизель-электрическая передача представляет собой сложную систему. Ее, в принципе, возможно описать единой системой уравнений. Однако такой подход в силу трудности восприятия результата не может считаться рациональным. Наиболее оптимальным вариантом является составление функциональной схемы с дальнейшим математическим описанием всех ее элементов.



Рис. 1. Функциональная схема электрической передачи (последовательная схема)

В машинах с автономным источником энергии создание высокоэффективных конструкций возможно только путем рассмотрения всего комплекса энергетических и кинематических звеньев, участвующих в процессе преобразования и использова-

ния энергии. Этот комплекс можно разбить на три взаимосвязанных элемента: первичный двигатель, промежуточные передачи и рабочий механизм (РМ). В автономных электроэнергетических установках основным видом первичного двигателя является дизель (рис. 1, ДВС), так как он имеет, по сравнению с другими тепловыми машинами, наиболее высокий КПД [1]. Существуют три основных способа передачи энергии от первичного двигателя на рабочий механизм: механическая передача, гидравлическая, электрическая, а также всевозможные их комбинации. Наибольший интерес представляет электрическая передача, обладающая возможностью рекуперации энергии. Промежуточным звеном является электрическая передача, состоящая из двух асинхронных машин АМ1 и АМ2, двух автономных инверторов напряжения АИН1 и АИН2 с общим звеном постоянного тока (ЗПТ). Параллельно ЗПТ возможно подключение аккумуляторной батареи. Зарядка аккумуляторной батареи может осуществляться независимо от режима работы генератора и двигателя, в том числе и одновременно с выполнением ими основных функций. В системе предусматривается рекуперация энергии, а также накопление рекуперированной энергии во вращающихся массах первичного двигателя. При использовании аккумуляторной батареи достаточно большой мощности допускается работа двигателя от нее при остановленном генераторе. При отключенном генераторе возможно создание с помощью транзисторного выпрямителя стабилизированной сети переменного напряжения с питанием от аккумуляторной батареи.

Следует отметить, что изучению дизель-электрической передачи и составлению ее математической модели посвящены работы ряда авторов. Например, в [3] приводится математическая модель дизель-электрической передачи на базе дизеля, генератора постоянного тока (ГПТ) и электропривода на базе асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором. Основной особенностью ГПТ является возможность независимого управления потоком и током машины. То же самое можно сказать и об АД, система управления которого построена по принципу векторного управления с использованием в качестве опорного вектора потокосцепления ротора. Таким образом, по числу входов и их физическому смыслу в данном случае модели ГПТ и АД являются идентичными. Безусловным яв-

ляется их различие в принципе действия, что находит выражение в математических уравнениях, описывающих их. Математическая модель АД есть математическое описание ее динамической механической характеристики, которое представляет собой систему дифференциальных уравнений четвертого порядка. Существует несколько вариантов записи этих уравнений в зависимости от выбора системы координат, в которых рассматриваются обобщенные векторы электрических переменных статора и ротора АД. Нами используется система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в АД в неподвижных осях  $\alpha$ - $\beta$ , которую можно найти в [4]. Трехфазный мостовой АИН содержит шесть вентиляльных комплектов, являющихся схемными аналогами ключа, обладающего двусторонней проводимостью. Коммутационные процессы в силовой схеме не рассматриваются, поэтому инверторы напряжения представлены в виде идеальной ключевой схемы [5]. В АИН реализован закон управления выходным напряжением «по шестиугольнику», амплитуда выходного напряжения задается внешним сигналом. Основная функция АИН – формирование симметричной системы трехфазных токов. Главной особенностью симметричных систем является равенство нулю суммы всех составляющих системы в любой момент времени. Шесть вентиляльных комплектов можно разделить на 2 группы: первая – ключи к1, к2, к3, коммутирующие положительное напряжение; вторая – ключи к4, к5, к6, коммутирующие отрицательное напряжение. В алгоритме работы АИН следует предусмотреть защиту от короткого замыкания (КЗ) источника питания, поэтому комбинации замыкания ключей к1–к4, к2–к5, к3–к6 запрещены. Принимая во внимание ограничения, связанные с КЗ источника питания, и условие симметрии выходных напряжений инвертора, составим таблицу соответствия комбинаций замыкания ключей и выходных напряжений (см. таблицу). С использованием данных этой таблицы можно записать уравнение выходного напряжения для фазы А, учитывая, что замкнутому состоянию ключа соответствует «1», а разомкнутому – «0»:

$$U_A = \frac{2}{3}(k1 \& k5 \& k6) + \frac{1}{3}(k5 \& k1 \& k3) \wedge (k6 \& k1 \& k2) - \frac{1}{3}(k3 \& k4 \& k5) \wedge (k2 \& k4 \& k6) - \frac{2}{3}(k4 \& k2 \& k3). \quad (1)$$

Аналогичные уравнения составляются для фаз В и С.

**Соответствие комбинаций замыкания ключей выходным напряжениям питания**

Ua	Ub	Uc	Комбинация ключей
2/3 Uп	-1/3 Uп	-1/3 Uп	к1–к5–к6
1/3 Uп	-2/3 Uп	1/3 Uп	к5–к1–к3
-1/3 Uп	-1/3 Uп	2/3 Uп	к3–к4–к5
-2/3 Uп	1/3 Uп	1/3 Uп	к4–к2–к3
-1/3 Uп	2/3 Uп	-1/3 Uп	к2–к4–к6
1/3 Uп	1/3 Uп	-2/3 Uп	к6–к1–к2

Первичным источником энергии в модели является ДВС, механическая энергия с которого передается непосредственно на вал АМ1. Дизель, в соответствии с [3], представлен аperiodическим зве-

ном первого порядка, его структурная схема приведена на рис. 2.

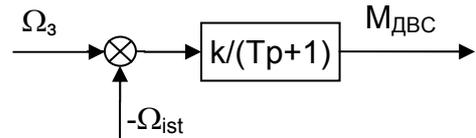


Рис. 2. Структурная схема ДВС

ЗПТ в модели дизель-электрической передачи представлено в виде емкостного элемента с начальным зарядом. Являясь связующим звеном между АМ1, работающей в генераторном режиме, и АМ2, работающей в двигательном режиме, этот элемент характеризуется следующими величинами: напряжением, вырабатываемым АМ1, током, потребляемым АМ2, током через сам элемент. Графическая интерпретация сказанного представлена на рис. 3.

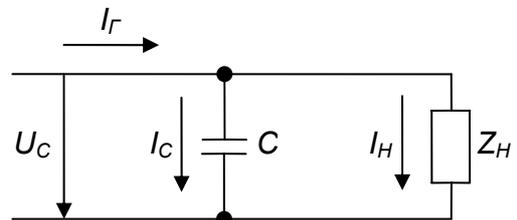


Рис. 2. Схема замещения звена постоянного тока

На электрической схеме  $U_C$  соответствует напряжению, генерируемому АМ1,  $I_C$  – току через ЗПТ, а  $I_H$  – потребляемому току. Получим выражения для определения токов  $I_C$  и  $I_H$ . Из баланса электрической и механической мощности для АМ1 и АМ2 справедливо следующее выражение:

$$P_{эл} = P_{мех} \quad (2)$$

Электрическая и механическая мощности определяются следующим образом:

$$P_{эл} = U_C I_r, \quad (3)$$

$$P_{мех} = M_{AM1} \Omega_{дизеля}; \quad (4)$$

для АМ2

$$P_{эл} = U_C I_H, \quad (1)$$

$$P_{мех} = M_{AM2} \Omega_{ротора}. \quad (2)$$

Так как момент АМ прямо пропорционален векторному произведению потокосцепления ротора и тока статора [5], то наиболее простой вид это уравнение принимает в системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора:

$$M_{AM} = k |\Psi_r| i_s^v, \quad (3)$$

где  $i_s^v$  – активная составляющая тока статора в системе координат u-v.

Для напряжения на емкостном элементе можно записать

$$U_C = \frac{1}{C} \int I_C dt. \quad (4)$$

Ток через емкостный элемент определяется следующим образом:

$$I_C = I_r - I_H, \quad (5)$$

где  $I_H$  – ток, потребляемый АМ2.

Генерируемый ток  $I_r$  (функциональный элемент АМ1) находится по формуле

$$I_r = \frac{k|\Psi_r|i_s^v\Omega_r}{U_c} \quad (6)$$

Физический смысл переменных в (10) приведен в [4].

Потребляемый ток  $I_H$  находится по формуле, аналогичной (10), для переменных исполнительного двигателя АМ2.

Так как для вычисления тока заряда и тока, потребляемого АМ2, использовались электрические величины во вращающейся системе координат  $u-v$ , связанной с вектором потокосцепления ротора, в имитационную модель включены преобразователи координат  $\alpha\beta-uv$ ,  $uv-\alpha\beta$  и фаз 2/3 и 3/2, уравнения которых можно найти в [4].

Описав все функциональные элементы, входящие в имитационную модель, приведем ее полное описание. Первичным источником энергии в модели является ДВС, механическая энергия с которого передается непосредственно на вал АМ1. Считаем, что вал электрической машины жестко связан с приводным двигателем. Для АМ1 задаются проекции токов статора в осях  $u-v$ , определяющие соответственно поток машины и генерируемое напряжение. Для АМ2 также задаются значения проекций токов статора в осях  $u-v$  с той лишь разницей, что они определяют установившиеся скорость вращения ротора и поток машины. Таким образом, при одинаковых мощностях АМ1 и АМ2 с учетом достаточной мощности ДВС, а также предварительно заряженном конденсаторе система будет устойчиво работать исходя из баланса мощностей.

Для подтверждения адекватности модели был проведен численный эксперимент, цель которого – получение кривых переходных процессов основных величин системы, соответствующих физическим процессам, протекающим в ней. При проведении эксперимента с учетом вышесказанного были приняты следующие основные допущения: в модели системы не учитывались нелинейность механической характеристики ДВС, а также переходные процессы в ключах АИН. В ходе эксперимента моделируется рабочая ситуация пуска дизель-электрической передачи при номинальной нагрузке на валу АМ2, номинальной скорости вращения ротора АМ1 и номинальном моменте ДВС. Результаты моделирования приведены на рис. 4–10.

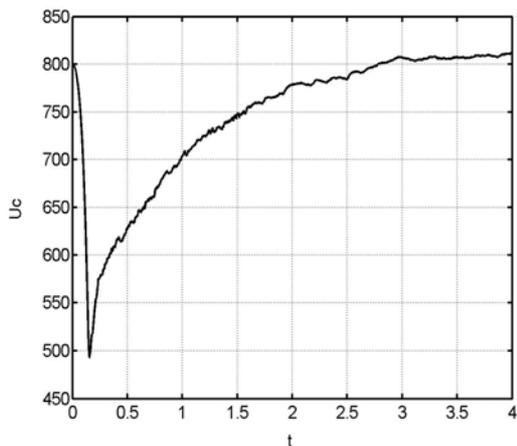


Рис. 3. Зависимость напряжения на конденсаторе от времени

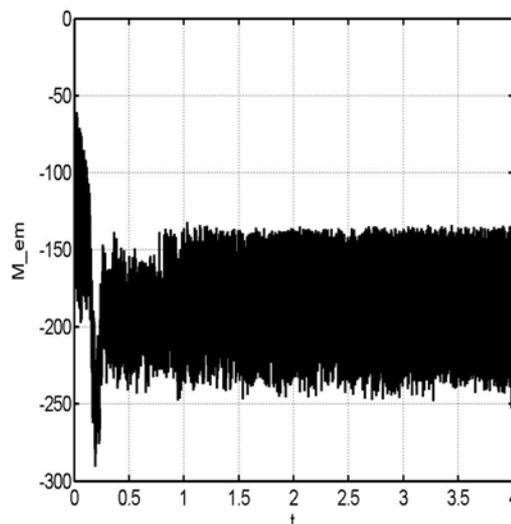


Рис. 4. Зависимость электромагнитного момента генератора от времени

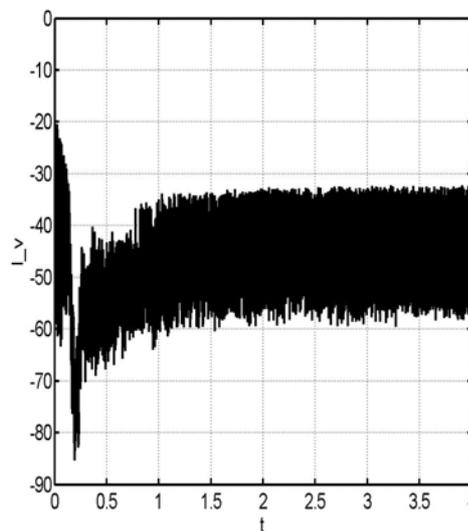


Рис. 5. Зависимость активной составляющей тока генератора от времени

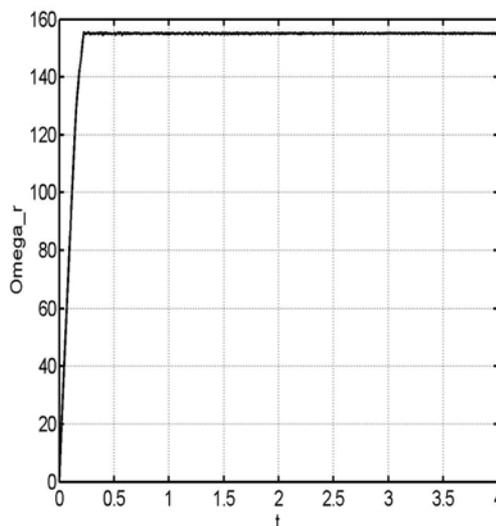


Рис. 6. Зависимость угловой скорости вращения ротора генератора от времени

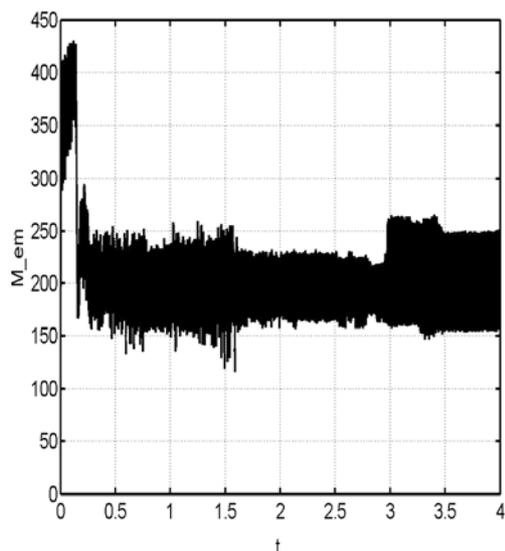


Рис. 7. Зависимость электромагнитного момента двигателя от времени

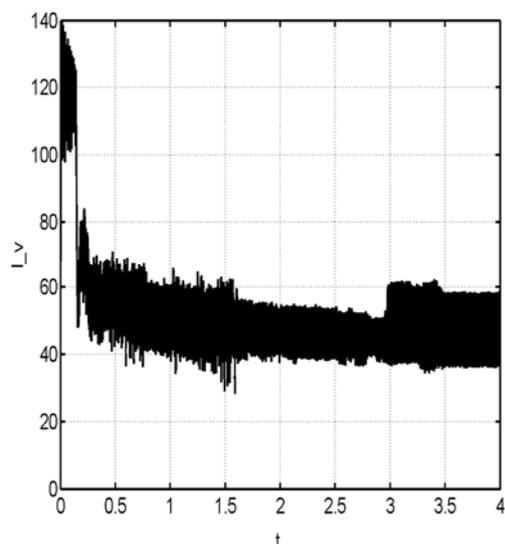


Рис. 8. Зависимость активной составляющей тока двигателя от времени

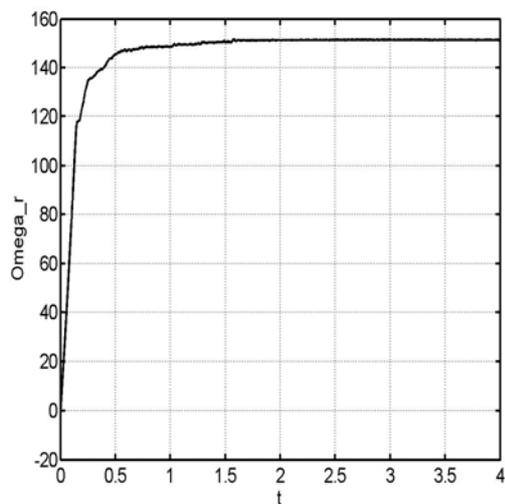


Рис. 9. Зависимость угловой скорости вращения ротора двигателя от времени

Анализ графиков показывает, что все наблюдаемые параметры системы в течение эксперимента выходят на установившиеся значения. Проанализируем полученные кривые переходных процессов. На кривой  $U_c(t)$  (рис. 4) можно выделить три характерные точки: начало переходного процесса, точку, в которой напряжение на емкости начинает расти, и точку, в которой напряжение на емкости принимает задаваемое значение. Участок кривой между первой и второй точками наглядно демонстрирует, что для разгона привода, нагруженного номинальным моментом, энергия сначала берется с предварительно заряженного конденсатора. С него же берется энергия, затрачиваемая на электромагнитный переходный процесс в самом генераторе. Второй точке соответствует момент выхода скорости вращения ротора генератора на номинальное значение, а значит, завершение механического переходного процесса, и, как следствие, высвобождение энергии первичного двигателя в заряде конденсатора. Заряд конденсатора до заданного значения происходит на участке кривой между второй и третьей точками. Анализ полученных кривых переходных процессов позволяет утверждать, что модель адекватна реальной системе с указанными ограничениями. Как и следовало ожидать, электромеханические переходные процессы в генераторе влияют на электромеханические переходные процессы в двигателе. Это влияние можно оценить по такому параметру системы, как напряжение на конденсаторе. Анализ кривых показывает, что постоянство и заданная величина этого напряжения соответствуют требуемым характеристикам привода. Поэтому основной задачей при дальнейшем развитии модели является стабилизация напряжения на емкостной батарее.

#### Список литературы

1. Крайцберг М.И. Электропривод при автономном источнике энергии. – М.: Энергия, 1966.
2. Злакоманов В.В., Яковлев Б.С. Взаимодействие динамических систем с источниками энергии. – М.: Энергия, 1980.
3. Голубев А.Н. Многофазный асинхронный регулируемый электропривод для высокодинамичных систем подвижных установок: Дис... д-ра техн. наук, 05.09.03. – СПб., 1994.
4. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979.
5. Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1982.

Голубев Александр Николаевич,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,  
zav@toe.ispu.ru

Быков Александр Владимирович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,  
zav@toe.ispu.ru