

УДК 621.316

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Т. Н. Фадейкин

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)  
ул. Новосуцёвская, 22, г. Москва, 127994, Россия. E-mail: teplovoz\_777@mail.ru

На стадии разработки тяговых электроприводов электроэнергетических систем необходим анализ электромагнитных и энергетических процессов в различных эксплуатационных и аварийных режимах. Расчёт сложных многокомпонентных электромеханических систем современных транспортных средств возможен только методом моделирования на цифровой вычислительной машине. Программирование таких сложных систем традиционными способами практически невозможно, либо же это связано с большими затратами времени и средств. Применение универсальных систем моделирования – единственно возможный способ моделирования многокомпонентных систем. В данной работе рассматривается математическая модель синхронного генератора автономного транспортного средства в системе автоматизированного проектирования OrCAD 10.0 (Pspice). Программный пакет OrCAD 10.0 (Pspice) является одним из наиболее универсальных в области моделирования электрических цепей с большим числом компонентов. Библиотеки OrCAD не только содержат проверенные годами практического применения математические модели компонентов электроэнергетики, но и непрерывно пополняются. Приводятся характеристики для различных режимов работы синхронного генератора.

**Ключевые слова:** тяговый электропривод, автономный локомотив, судовой двигатель, математическая модель, энергетические процессы, электромеханическая система, синхронный генератор, петля гистерезиса.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА АВТОНОМНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Т. М. Фадейкін

Московський державний університет шляхів сполучення (МІІТ)  
вул. Новосуцєвська, 22, м. Москва, 127994, Росія. E-mail: teplovoz\_777@mail.ru

На стадії розробки тягових електроприводів електроенергетичних систем необхідний аналіз електромагнітних і енергетичних процесів у різних експлуатаційних та аварійних режимах. Розрахунок складних багатокомпонентних електромеханічних систем сучасних транспортних засобів можливий тільки методом моделювання на цифровій обчислювальній машині. Програмування таких складних систем традиційними способами практично неможливо, або ж це пов'язано з великими витратами часу й засобів. Застосування універсальних систем моделювання – єдино можливий спосіб моделювання багатокомпонентних систем. У даній роботі розглядається математична модель синхронного генератора автономного транспортного засобу в системі автоматизованого проектування OrCAD 10.0 (Pspice). Програмний пакет OrCAD 10.0 (Pspice) є одним із найбільш універсальних в області моделювання електричних ланцюгів із великим числом компонентів. Бібліотеки OrCAD не тільки містять перевірені роками практичного застосування математичні моделі компонентів електроенергетики, але й безперервно поповнюються. Наводяться характеристики для різних режимів роботи синхронного генератора.

**Ключові слова:** тяговий електропривод, автономний локомотив, судновий двигун, математична модель, енергетичні процеси, електромеханічна система, синхронний генератор, петля гістерезису.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В последние годы на стадии проектирования и разработки тяговых электроприводов автономных транспортных средств находит применение система автоматизированного проектирования (САПР). Электроэнергетическая система (ЭЭС) транспортных средств представляет собой сложные системы, состоящие из нескольких дизель- или турбогенераторов и десятков и даже сотен асинхронных двигателей, десятков статических нагрузок. Наиболее целесообразно проводить исследование таких систем с использованием моделей синхронных генераторов в фазовых координатах. Однако наличие переменных коэффициентов в уравнениях этих элементов вызывает большие вычислительные трудности при решении поставленной задачи традиционными методами. Предлагается метод моделирования машинных автоматизированных ЭЭС с использованием САПР OrCAD 10.0. Основной частью системы является программа Pspice

[1, 2]. В библиотеках компонентов OrCAD нет синхронных генераторов. В литературе по использованию САПР OrCAD отсутствуют рекомендации и правила разработки таких компонентов.

Целью данной работы является разработка модели синхронного генератора с использованием OrCAD 10.0. (Pspice) [1, 2].

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** В тяговых электроприводах современных транспортных средств, в том числе и автономных локомотивов железных дорог, судов и кораблей, независимо от типа приводных (тяговых) электродвигателей, в качестве первичного источника электроэнергии применяют синхронные генераторы, приводимые во вращение либо дизельными двигателями, либо турбинами [3–8].

Структура судовой ЭЭС изображена на рис. 1. Судовая электроэнергетическая система включает в себя электростанцию и систему распределения элект

троэнергии. Если в качестве первичных двигателей используются дизельные двигатели или газовые турбины, то на первом этапе химическая энергия топлива преобразуется в механическую энергию вращения, на втором – происходит преобразование механической энергии в электрическую с помощью генераторов, синхронных или постоянного тока, в зависимо-

сти от типа электростанции. Если генераторы вращаются паровыми турбинами, то вначале энергия топлива с помощью парогенератора (парового котла) переходит в энергию водяного пара, преобразуется с помощью турбины в механическую энергию и только после этого с помощью генератора преобразует в электрическую.

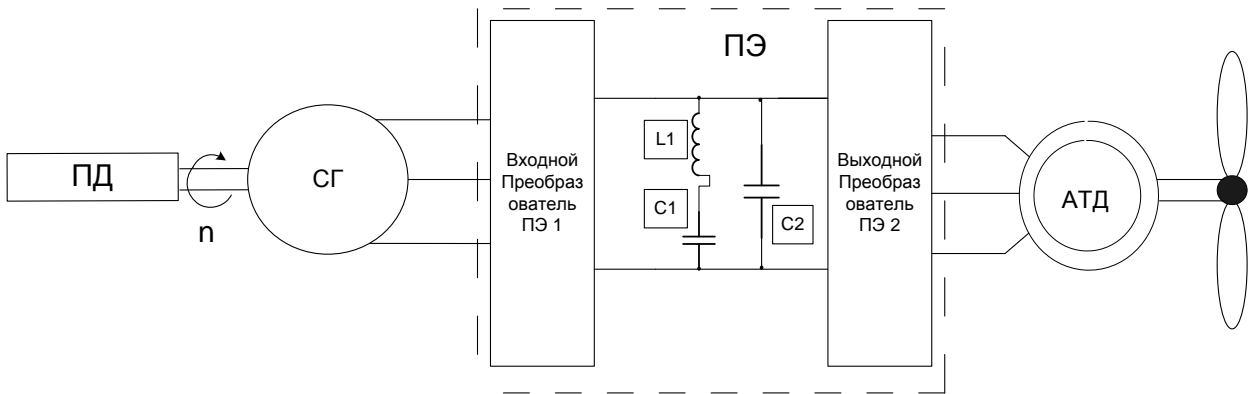


Рисунок 1 – Структура судовой электроэнергетической системы: ПД – приводной двигатель; СГ – синхронный генератор; ПЭ – преобразователь электроэнергии; АТД – асинхронный тяговый двигатель

Электроэнергетическая система автономного локомотива может быть представлена структурой, изображённой на рис. 2 и содержащей четыре модуля (1–4).

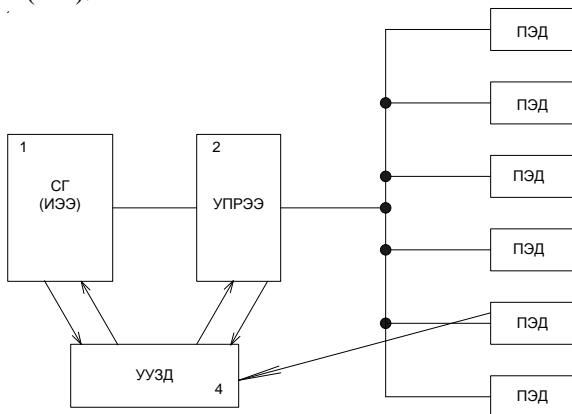


Рисунок 2 – Структура силовой цепи электрооборудования тягового электропривода автономного локомотива: 1 – синхронный генератор (источник электроэнергии); 2 – устройство преобразования и регулирования электроэнергии; 3 – приводные электродвигатели; 4 – устройство управления, защиты и диагностики

В конструкции автономного локомотива применяется V-образный дизель типа Д49 с электронным впрыском, новый тяговый агрегат типа АСТГ2 2800/400–1000, статический тяговый и вспомогательный преобразователь собственных нужд. Тяговый агрегат каждой секции состоит из тягового и вспомогательного синхронных трёхфазных генераторов, конструктивно выполненных в одном корпусе [5]. Синхронный генератор, приводимый во вра-

щение дизелем, имеет две трёхфазные обмотки, соединенные по схеме «звезда» со сдвинутыми относительно друг друга на 30 электрических градусов одноимёнными фазными напряжениями. Для возбуждения тягового агрегата используется двухканальный управляемый выпрямитель типа ВТПП–220–220–100. Он преобразует трёхфазное напряжение синхронного вспомогательного генератора в регулируемые по величине напряжения выпрямленного тока, используемые для питания обмоток возбуждения тягового и вспомогательного генераторов агрегата. Вспомогательный генератор (ВГ) также имеет две трёхфазные статорные обмотки, одноимённые фазные напряжения которых сдвинуты друг относительно друга на 30 электрических градусов.

Анализ электромагнитных и энергетических процессов в электроприводах таких средств, в том числе и сравнительный, наиболее целесообразно проводить на математических моделях тяговых электроприводов, позволяющих с любой требуемой точностью вводить в анализируемую систему параметры входящих в неё элементов, включая источник электроэнергии, преобразователи и регуляторы параметров передаваемой от источника к тяговым электродвигателям энергии и сами тяговые электродвигатели.

Наиболее пригодным для моделирования электромагнитных и энергетических процессов в сложных многокомпонентных электромеханических системах, к которым, безусловно, относятся и тяговые электроприводы, является программный пакет OrCAD 10.0, позволяющий производить многовариантные расчёты электромагнитных и энергетических процессов в таких системах за приемлемое время.

При использовании указанного программного пакета анализируемая система разбивается на связанные между собой отдельные модули, управление которыми осуществляется по определенному алгоритму.

Для каждого из модулей анализируемой системы в зависимости от целей анализа, определяющих необходимые допущения, должны быть составлены математические модели, взаимодействие которых друг с другом, определяемое заданным алгоритмом управления, позволит получить требуемое решение задачи.

В данной работе рассматривается математическая модель входного модуля анализируемой системы – синхронного генератора типа СГДМ–5000–8–ОМ4, используемый в тяговых электроприводах судовых транспортных средств.

Построение модели синхронного генератора начнём с создания модели магнитного сердечника.

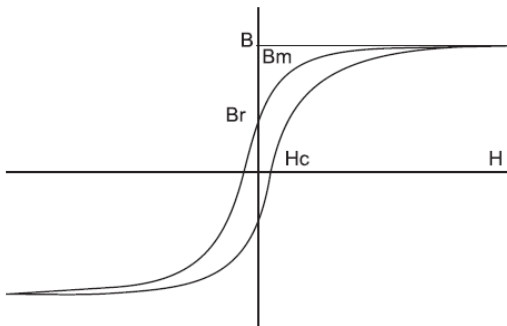


Рисунок 3 – Петля гистерезиса для материала сердечника

Модель сердечника строится по шаблону, созданному на основании модели Джилса-Атертона [3, 4]. Исходными данными для построения модели являются:

- 1) величина зазора, Gap (сантиметры);
- 2) площадь поперечного сечения сердечника, Area (квадратные сантиметры);
- 3) длина средней линии сердечника, Path (сантиметры);
- 4) коэффициент заполнения сердечника, Pack (безразмерная величина).

Для построения модели сердечника необходимо задать петлю гистерезиса для материала сердечника (рис. 3).

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

- Hc (Эрстед) – напряженность электромагнитного поля сердечника при индукции, равной нулю;
- Bg (Гаусс) – индукция в сердечнике при напряженности электромагнитного поля, равной нулю;
- Hm (Эрстед) – напряженность электромагнитного поля сердечника при индукции, равной индукции насыщения;
- Bm (Гаусс) – индукция насыщения.

Кроме этого, задается значение первоначального намагничивания (Initial Perm).

Исходная информация вводится в редакторе Model Editor в таблицы Hysteresis Curve и Parameters. Информация в таблицу Hysteresis Curve вводится в виде:

- 1) (0, Bg);
- 2) (Hc, 0);
- 3) (Hm, Bm).

Попытка более точного построения петли гистерезиса по большому количеству точек не дает положительных результатов, т.к. в редакторе Model Editor рассматриваются только три первых занесенных в таблицу пары чисел.

В версии OrCAD 9.2 используется второй уровень (LEVEL = 2) модели сердечника, а в версии OrCAD 10.0 – на выбор второй (LEVEL = 2) или третий (LEVEL = 3).

Для третьего уровня вводятся следующие допущения [7].

1. Петля является статической, ее форма не зависит от частоты изменения напряженности H электромагнитного поля.

2. Для модели сердечника индукция насыщения  $B_m$  определяется как асимптота петли гистерезиса.

Производители сердечников обычно определяют насыщение как точку на петле гистерезиса, выше которой снижение проницаемости в сердечнике начинает ограничивать его применение.

Если значения  $B_m$  принимаются непосредственно из справочных таблиц производителей сердечников, то модели сердечника будут работать с заниженным значением величины  $B_m$ . Принимая во внимание различные определения индукции насыщения, не рекомендуется использовать значения  $B_m$  из справочных данных; вместо этого следует использовать значения  $B_m$ , определенные непосредственно по петле гистерезиса.

3. Модель воздушного зазора может быть некорректной при низких рабочих частотах (обычно < 100 Гц). Получаемая при этом погрешность вызвана резистором сопротивлением 0,001 Ом, включенным последовательно с индуктивностью сердечника. Для повышения точности моделирования воздушного зазора должно быть выполнено одно из нижеперечисленных условий: сопротивление обмотки больше или равно 0,1 Ом; индуктивная составляющая импеданса ( $Z_L$ ) больше или равна 0,1 Ом. Проверка показала, что в нашем случае эти условия выполняются.

Величина индуктивной составляющей импеданса рассчитывается по выражению

$$|Z_L| = \omega L_{eq}, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота;  $L_{eq}$  – эквивалентная индуктивность.

При замене  $L_{eq}$  на эквивалентное выражение, получаем

$$|Z_L| = \frac{2\omega \mu A n}{L}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $A$  – площадь;  $n$  – число витков;  $L$  – длина.

4. Результаты расчета цепи, содержащей сердечник, индукция насыщения  $B_m$  в котором по величине больше, чем  $10^6$  Гс, могут расходиться с результатами моделирования реальных сердечников [2].

В случае возникновения проблем со сходимостью при моделировании сердечника с очень большой индукцией насыщения и очень низкой коэрцитивной силой следует заменить сердечник на идеальный, модель которого обеспечивает расчет при бесконечной индукции насыщения и нулевой коэрцитивной силе.

В [3] рассмотрены вопросы модификации PSpice-модели магнитного сердечника, позволяющие определять его параметры по справочным характеристикам, а также предложены модификации PSpice-модели для учета магнитных свойств материалов:

MS – намагниченность насыщения (magnetization saturation) (ампер/метр) = 4903089,039498;

A – параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания (thermal energy parameter) (ампер/метр) = 48,64212819596;

C – постоянная упругого смещения доменных границ (domain flexing parameter) = 0,01001;

K – постоянная подвижности доменов (domain anisotropy parameter) (ампер/метр) = 19,8446694766.

Петля гистерезиса для построенной модели сердечника приведена на рис. 4.

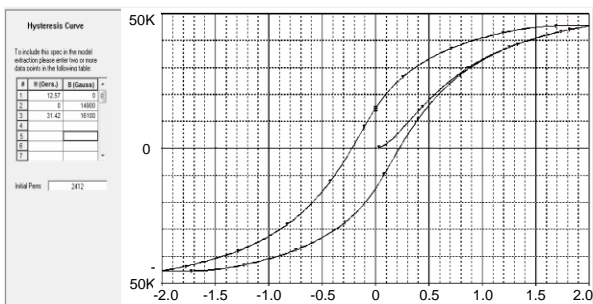


Рисунок 4 – Петля гистерезиса для модели сердечника из листовой электротехнической стали 2412

Теперь построим модель конкретного магнитного сердечника. Его параметры, согласно заданию: GAP=0,968 см; AREA=143,184 см<sup>2</sup>; PATH=101,9 см; PASC=1. В качестве материала сердечника использовалась листовая электротехническая сталь 2412. Значения  $B_r$ ,  $H_c$ ,  $H_m$  и  $B_m$  на нее берем из паспорта. Так,  $H_c=12,57$  эрстед,  $B_r=1,49 \cdot 10^4$  Гс,  $H_m=31,42$  эрстед,  $B_m=1,6 \cdot 10^4$  Гс. По приведенным данным рассчитаны следующие необходимые характеристики модели.

Следующим шагом будет построение модели синхронного генератора, работающего в режимах короткого замыкания и холостого хода [6], электри-

ческая принципиальная схема которого приведена на рис. 5.

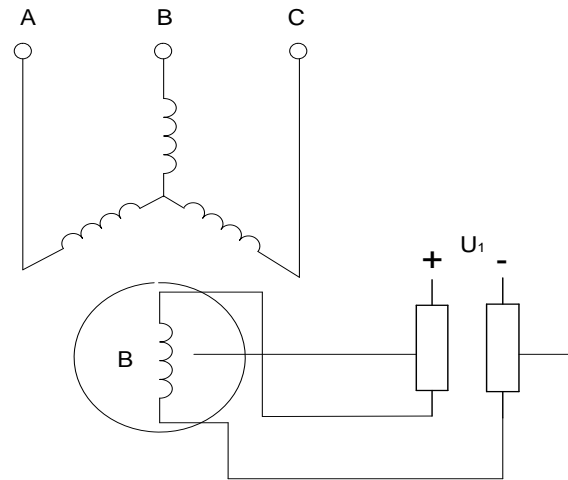


Рисунок 5 – Электрическая принципиальная схема синхронного генератора: B – синхронный возбудитель

ЭЭС транспортных средств представляют собой сложные системы, состоящие из нескольких дизельных турбогенераторов и десятков и даже сотен асинхронных двигателей, десятков статических нагрузок. Наиболее целесообразно проводить исследование таких систем с использованием моделей синхронных генераторов в фазовых координатах. Однако наличие переменных коэффициентов в уравнениях этих элементов вызывает большие вычислительные трудности, которые при решении поставленной задачи традиционными методами исследования до сих пор неопределенны. Дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы в синхронном генераторе, имеют только постоянные коэффициенты лишь в случае, когда магнитные оси обмоток статора и ротора, а также магнитные оси обмоток и явно выраженные полюсы неподвижны относительно друг друга. В настоящее время задачи исследования переходных процессов в ЭЭС решаются с использованием моделей синхронных генераторов, записанных в осях  $d, q$ . Для этого производится линейное преобразование уравнений, при котором действительные переменные заменяются новыми. Такая замена переменных осуществляется методом преобразования координат. С этой целью неподвижная система координат, связанная со статором, заменяется новой ортогональной координатной системой, вращающейся вместе с ротором. Преобразование производится с помощью метода изображающих векторов. Под изображающим вектором понимают такой вектор, проекции которого на оси фаз дают его фазовые составляющие, а проекции этого вектора на оси ротора дают продольную и поперечные составляющие [9, 10].

Проекция изображающего вектора  $I$  на оси ротора:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} \left( i_a \cos \gamma + i_b \cos \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right); \\ i_q &= \frac{2}{3} \left( i_a \sin \gamma + i_b \sin \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Проекції зображуючого вектора  $I$  на осі фаз:

$$\begin{aligned} i_a &= i_d \cos \gamma - i_q \sin \gamma; \\ i_b &= i_d \cos \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) - i_q \sin \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right); \\ i_c &= i_d \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) - i_q \sin \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Проекції потокосцеплень з урахуванням вибраного напрямлення  $\Psi_d$ :

$$\begin{aligned} \Psi_d &= -\frac{2}{3} \left( \Psi_a \cos \gamma + \Psi_b \cos \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \Psi_c \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right); \\ \Psi_q &= -\frac{2}{3} \left( \Psi_a \sin \gamma + \Psi_b \sin \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \Psi_c \sin \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Psi_a &= -\Psi_d \cos \gamma - \Psi_q \sin \gamma; \\ \Psi_b &= -\Psi_d \cos \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) - \Psi_q \sin \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right); \\ \Psi_c &= -\Psi_d \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) - \Psi_q \sin \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Проекції вектора напруг:

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{2}{3} \left( u_a \cos \gamma + u_b \cos \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + u_c \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right); \\ u_q &= -\frac{2}{3} \left( u_a \sin \gamma + u_b \sin \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + u_c \sin \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} u_a &= u_d \cos \gamma - u_q \sin \gamma; \\ u_b &= u_d \cos \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) - u_q \sin \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right); \\ u_c &= u_d \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) - u_q \sin \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Представлення в такому виді математических моделей синхронних генераторів в случає використання програми PSpice a/d являється определяющим. Составление уравнений связи между записанными таким образом моделями электрических машин берёт на себя программа PSpice a/d, и они составляются автоматически, без вмешательства исследователя. Кроме того, построенные модели хорошо интегрируются в состав имеющихся в библиотеках DesignLab компонентов.

Вид дифференциальных уравнений электрических машин переменного тока в зависимости от выбора направления векторов напряжений, потокосцеплений, исходного режима (генераторного или двигательного) различен. Метод исследования переходных процессов с использованием программы PSpice пригоден для любой формы записи дифференциальных уравнений [11].

Рассмотрен трёхфазный синхронный генератор с явнополюсным ротором. Генератор имеет симметричную трёхфазную обмотку на статоре. На роторе

расположены обмотка возбуждения и успокоительная (демпферная) обмотка. Демпферная обмотка предназначена в основном для успокоения колебаний ротора, улучшения условий втягивания в синхронизм и недопущения перенапряжений в обмотках статора при несимметричных нагрузках. Система дифференциальных уравнений, описывающих переходные электромагнитные и электромеханические процессы в синхронном генераторе, включает в себя уравнения равновесия напряжений всех электрических контуров на статоре и роторе и уравнение движения ротора [9]:

$$\begin{cases} \Psi_d = x_s i_d - E_{\delta q}; \\ \Psi_q = x_s i_q - E_{\delta d}; \\ \Psi_r = \frac{x_{ad}}{x_r} E_{\delta q} + \frac{x_{sr}}{x_r} E_q; \\ \Psi_{rdi} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q} + \frac{x_{srdi}}{x_{rdi}} E_{rqi}; \\ \Psi_{rqk} = -\frac{x_{aq}}{x_{rqk}} E_{\delta d} - \frac{x_{srqk}}{x_{rdi}} E_{rdk}; \\ \frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{1}{T_r} (E_r - E_q); \\ \frac{d\Psi_{rdi}}{dt} = -\frac{1}{T_{rdi}} E_{rqi}; \\ \frac{d\Psi_{rqk}}{dt} = -\frac{1}{T_{rqk}} E_{rdk}; \\ \frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j} (M_\tau - M_e); \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_s (s - s_0); \\ E_{\delta q} = \mathbf{v}_d \left( x_{ad} i_d + E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi} \right); \\ \frac{1}{\omega_s} \frac{d\Psi_d}{dt} + (1+s)\Psi_q + r i_d = -u_d; \\ (1+s)\Psi_d + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\Psi_q}{dt} - r i_q = u_q, \end{cases}$$

где  $\Psi_d, \Psi_q, i_d, i_q$  – потокосцепления и токи эквивалентных демпферных обмоток по продольной и поперечной осям соответственно;  $x_s$  – реактивное сопротивление рассеяния статора;  $E_{\delta d}, E_{\delta q}$  – продольная и поперечная составляющая ЭДС;  $x_{ad}, x_{aq}$  – реактивные сопротивления реакции статора (якоря) по продольной и поперечной осям;  $r$  – активное сопротивление обмотки статора;  $x_r = x_{ad} + x_{sr}, x_{rdi} = x_{ad} + x_{srdi}, x_{rqk} = x_{aq} + x_{srqk}$  – реактивные сопротивления обмотки возбуждения, продольного и поперечного демпферных контуров;

$$\begin{aligned} E_q &= \frac{\omega_s M_{ad} i_r}{\omega_s M_{ad} i_{\delta r}}, & E_{rdk} &= \frac{\omega_s M_{ad} i_{rdi}}{\omega_s M_{ad} i_{\delta rd}}, \\ E_{rqi} &= -\frac{\omega_s M_{ad} i_{rqk}}{\omega_s M_{aq} i_{\delta rq}} - \text{ЭДС, индуцируемые в статоре} \end{aligned}$$

ре магнитным полем токов роторных контуров при синхронной частоте вращения ротора;  $x_{sr}$ ,  $x_{srdi}$ ,  $x_{srqk}$  – реактивные сопротивления рассеяния обмотки возбуждения, продольного и поперечного демпферных контуров;  $\Psi_r$ ,  $\Psi_{rdi}$ ,  $\Psi_{rqk}$  – потокоцепление обмотки возбуждения  $i$ -го продольного и  $k$ -го поперечного эквивалентных демпферных контуров;  $T_r = \frac{x_r}{\omega_s r_r}$  – постоянная времени обмотки

возбуждения при прочих разомкнутых контурах, с;  $E_r$  – напряжение возбуждения;  $s$  – скольжение;  $M_T$  – вращающий момент приводного двигателя генератора;  $M_E$  – электромагнитный момент генератора;  $\omega_s$  – синхронная угловая скорость;  $v_d$  – параметр насыщения по продольной оси;  $T_j = J \frac{\omega_s^2}{s \delta P^2}$  – инерционная постоянная генерирующего агрегата, с.

Схема построенной модели приведена на рис. 6. С помощью приведённой выше системы дифференциальных уравнений синхронного генератора с переменными коэффициентами можно моделировать все основные процессы синхронного генератора.

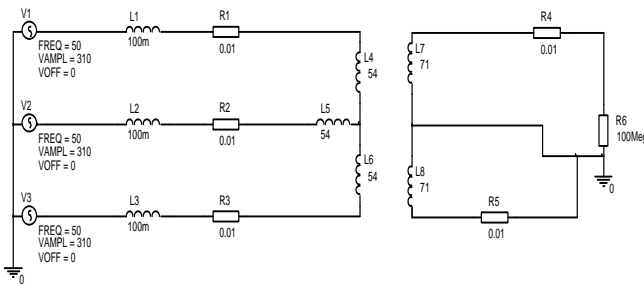


Рисунок 6 – Схема модели синхронного генератора

На данной схеме источниками синусоидального напряжения U1–U3 моделируется трехфазная сеть. Амплитуда напряжения – по 3642 вольт, величина постоянной составляющей равна 0, частота – 50 Гц. Сдвиг между фазами – по 120 электрических градусов. Индуктивности L1–L3 имитируют фильтры, предохраняющие от попадания помех в сеть. С помощью резисторов r1–r5 моделируется сопротивление проводов. Резистор r6 имитирует режим холостого хода, а резистор r7 – режим короткого замыкания. Индуктивности L4–L8 имитируют работу собственно генератора. Число витков взято из паспортных данных синхронного генератора типа СГДМ–5000–8–ОМ4. Элемент K2 имитирует работу сердечника, модель описана выше.

На рис. 7 приведена мощность в режиме холостого хода.

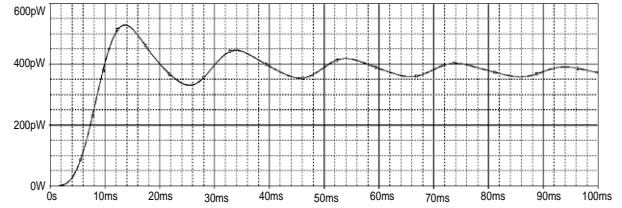


Рисунок 7 – Мощность в режиме холостого хода

На осциллограммах отчетливо видно, что в режиме холостого хода энергия практически не выделяется, что подтверждает адекватность модели. Из осциллограмм также следует, что качество регулирования находится на достаточно высоком уровне.

Наконец, последним этапом моделирования будет анализ процессов в синхронном генераторе, работающем на реальную нагрузку. Согласно расчетам, нагрузка имитируется источником тока I1. Полностью схема модели синхронного генератора приведена на рис. 8.

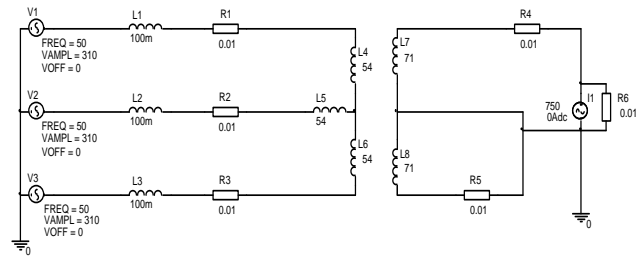


Рисунок 8 – Схема модели синхронного генератора, работающего на нагрузку

На рис. 9 приведены осциллограммы тока в нагрузке, а на рис. 10 – напряжения на нагрузке.

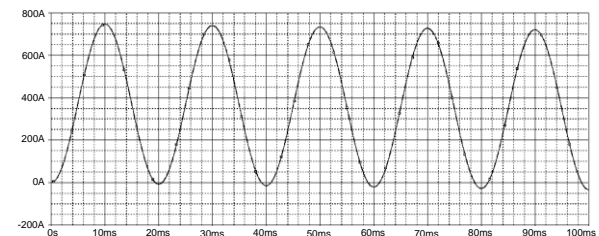


Рисунок 9 – Осциллограмма тока в нагрузке

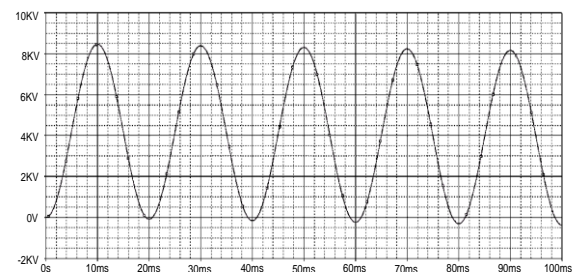


Рисунок 10 – Осциллограмма напряжения на нагрузке

**ВЫВОДЫ.** Представлены разработанные и синтезированные математические модели сердечника из листовой электротехнической стали 2412, синхрон-

ного генератора для режимов холостого хода и короткого замыкания, а также модель синхронного генератора, включённого на нагрузку, предназначенные для моделирования и исследования электромагнитных и энергетических процессов элементов тягового электропривода автономных транспортных средств в различных эксплуатационных и аварийных режимах. Анализ полученных в результате моделирования данных подтвердил адекватность разработанных моделей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. PSpice Reference Guide, Product version 9.2. // Cadence Design System, Inc. – 360 p.
2. PSpice A/D Reference Guide, Product version 10.0. // Cadence Design System Inc. – 426 p.
3. Недолужко И., Каюков Д. Модификация PSpice-модели магнитного сердечника // Силовая электроника. – СПб.: Файнстрит, 2005. – Вып. 1. – С. 116–119.
4. Токарев Л.Н. Судовая электротехника и электромеханика. – СПб.: Береста, 2006. – 324 с.

5. Стрекопытов В.В., Грищенко А.В., Кручек В.А. Электрические передачи локомотивов. – М.: Маршрут, 2003. – 310 с.

6. Воскобович В.Ю., Королёва Т.Н., Павлова В.А. Электроэнергетические установки и силовая электроника транспортных средств. – СПб.: Элмор, 2001. – 384 с.

7. Воскобович В.Ю. Моделирование гребных электрических установок с использованием систем OrCAD. – СПб.: Литера, 2008. – 199 с.

8. Токарев Л.Н., Комаров В.М., Васин И.М., Попель Г.В. Судовые электроэнергетические системы. – СПб.: ВМИИ, 2010. – 324 с.

9. Меркурьев Г.В., Шаргин Ю.М. Устойчивость энергосистем. Расчёты. – СПб.: НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2006. – 300 с.

10. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2006. – 607 с.

11. Васин И.М., Токарев Л.Н. Физические процессы в электрических машинах и системах. Математическое описание и расчёт. – СПб.: Литера, 2008. – 216 с.

#### THE MODELING ELEMENTS OF THE TRACTION ELECTRIC DRIVE AUTONOMOUS VEHICLES

**T. Fadeykin**

Moscow State University of Railway

ul. Novosushevskaya, 22, Moscow, 127994, Russia. E-mail: teplovoz\_777@mail.ru

At the stage of development of the traction electric power systems required analysis and electromagnetic energy processes in various operational and emergency conditions. Calculation of complex multicomponent Electromechanical systems of modern vehicles is only possible by simulation on a digital computer. Programming such complex systems in traditional ways is almost impossible, or it is connected with time-consuming means. The application of universal modeling systems – the only possible way of modeling multicomponent systems. In this paper we consider a mathematical model of the synchronous generator Autonomous vehicle in computer aided design OrCAD 10.0 (Pspice). Software OrCAD 10.0 (Pspice) is one of the most versatile in the field of modeling electrical circuits with a large number of components. Library OrCAD not only contain proven by years of practical application of a mathematical model of the components of the electricity industry, but continuously replenished. At the end of the article characteristics for different modes of operation of the synchronous generator.

**Key words:** Traction drive, auxiliary engine, marine engine, mathematical model, energy processes, electromechanical system, a synchronous generator, the hysteresis curve.

#### REFERENCES

1. PSpice Reference Guide, Product version 9.2., *Cadence Design System, Inc.*
2. PSpice A/D Reference Guide, Product version 10.0., *Cadence Design System Inc.*
3. Nedoluzhko, I. and Kayukov, D. (2005), "Modification of the PSpice model of the magnetic core", *Silovaya elektronika*, no. 1, pp. 116-119. (in Russian)
4. Tokarev, L.N. (2006), *Sudovaya elektrotehnika i elektromekhanika* [Ship electrical and electromechanical], Beresta, St. Petersburg. (in Russian)
5. Strekopytov, V.V., Grishchenko, A.V. and Kruchek, V.A. (2003), *Elektricheskiye peredachi lokomotivov* [Electrical transmission of locomotives], Marshrut, Moscow. (in Russian)
6. Voscobovich, V.Yu., Korolev, T.N. and Pavlov V.A. (2001), *Elektroenergeticheskiye ustanovki i silovaya elektronika transportnykh sredstv* [Electrical installation and power electronics of vehicles], Elmor, St. Petersburg. (in Russian)
7. Voscobovich, V.Y. (2008), *Modelirovaniye grebnykh elektricheskikh ustanovok s ispolzovaniyem*

*system OrCAD* [Simulation of the electric propulsion installations using systems OrCAD], Litera, St. Petersburg. (in Russian)

8. Tokarev, L.N., Komarov, V.M., Vasin, I.M. and Popel, G.V. (2010), *Sudovyye elektroenergeticheskiye sistemy* [Shipboard power system], WMII, St. Petersburg. (in Russian)

9. Merkuryev, G.V. and Shargin, Yu.M. (2006), *Ustoychivost energosistem. Raschoty* [Stability of power systems. Calculations], NOU "Tsentr podgotovki kadrov energetiki", St. Petersburg. (in Russian)

10. Kopylov, I.P. (2006), *Elektricheskiye mashiny* [Electric machine], Visshaya shkola, Moscow. (in Russian)

11. Vasin, I.M. and Tokarev, L.N. (2008), *Fizicheskiye protsessy v elektricheskikh mashinakh i sistemakh. Matematicheskoye opisanie i raschot* [Physical processes in electrical machines and systems. Mathematical description and calculation], Litera, St. Petersburg. (in Russian)

Стаття надійшла 12.05.2015