

УДК 621.313.821

В. В. ЧУМАК, М. А. КОВАЛЕНКО, А. И. ПОНОМАРЕВ

## ЦЕПЕ-ПОЛЕВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

Произведен анализ существующих математических моделей синхронных генераторов для моделирования их режимов работы и нагрузки. Разработано двухмерную цепе-полевою математическую модель синхронного генератора с постоянными магнитами автономной энергоустановки. На основании модели произведен расчет внешней характеристики для различных режимов работы генератора и для различных характеров нагрузки: чисто активного, активно-индуктивного и активно-ёмкостного ( $\cos\varphi=0.95$ ). показана целесообразность дальнейших исследований по разработке мер для стабилизации внешней характеристики.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, цепе-полевая математическая модель, синхронный генератор, постоянные магниты, индуцированная ЭДС, характер нагрузки.

**Введение.** Автономная энергоустановка состоит из первичной приводной системы (как правило, двигатель внутреннего сгорания (ДВС)) и генератора, как правило, синхронного, с электромагнитным возбуждением. Характерной особенностью работы системы на основе ДВС является диапазон работы нагрузок от 0,5 до 1,2 от номинальной мощности. Особенностью внешней характеристики такого генератора является расчётное напряжение холостого хода, значение которого близкое к напряжению при работе с нагрузкой близкой к 50 %. В таком случае, диапазон изменения внешней характеристики с учетом нормативных требований к автономным энергокомплексам (поддержка напряжения  $\pm 10$  %) должен составлять от 200 до 240 В при нагрузке от 0,5 до 1,2 номинальной мощности.

В последнее время нашли широкое применение синхронные генераторы с постоянными магнитами (СГПМ). Область их существования расширяется с появлением новых областей их применения (автономные энергокомплексы, возобновляемые и нетрадиционные источники энергии, военная сухопутная и морская техника, некоторые бытовые приборы и др.), а также с разработкой новых магнитов, которые обладают улучшенными характеристиками. К преимуществам СГПМ относятся относительно высокое значение КПД, высокая надежность и неприхотливость в обслуживании. К недостаткам таких систем относится то, что они являются практически не регулируемые и изготавливаются на относительно низкие максимальные мощности (до 100 кВт•А). Одним из вариантов стабилизации внешней характеристики есть использование магнитных шунтов.

**Целью статьи** является разработка цепе-полевою двухмерной математической модели СГПМ. В качестве объекта исследования выбран синхронный генератор (СГ) с магнитным шунтом на роторе, выполнен на базе серийного асинхронного двигателя (АД) АИР100L4. Предмет исследования: параметры и характеристики СГПМ.

Выбор АД в качестве базового обуславливается несколькими причинами: во-первых, АД – являются серийными, что в свою очередь означает, что они оптимизированы; во-вторых, использование статоров

АД для СГ означает унификацию генераторов. Используется данный генератор для высокоэффективных автономных энергоустановок переменного тока. Продольный эскиз СГ приведен на рис. 1 [1].

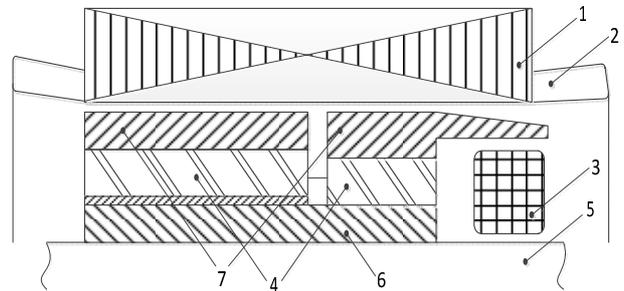


Рис. 1 – Эскиз СГПМ с магнитным шунтом

На рис. 1: 1 – магнитопровод статора; 2 – обмотка якоря; 3 – подмагничивающая обмотка; 4 – постоянные магниты; 5 – вал; 6 – втулка; 7 – полюсные наконечники.

Исследуемый СГПМ характеризуется следующими номинальными данными: мощность:  $P_n=4,0$  кВт, номинальное фазное напряжение  $U_n=220$  В, число пар полюсов  $p=4$ , частота вращения  $n=1500$  об/мин, частота выходного напряжения  $f=50$  Гц, материал постоянных магнитов NdFeBr-H-38.

**Математическая модель.** На сегодняшний день существует множество математических моделей СГПМ [2–5]. Они классифицируются как аналитические и численные [6]. Аналитические модели базируются на решении систем уравнений, расчете схем замещения, построении векторных диаграмм или основаны на результатах практической деятельности или результатов экспериментальных исследований. Численные методы нашли распространение в последние десятилетия с ростом вычислительных возможностей ЭВМ. Такие методы основаны на решении дифференциальных уравнений в частных производных и обеспечивают высокую точность и адекватность полученных результатов. Преимуществом численных методов является то, что они позволяют проводить разработку и расчет электромеханических преобразователей энергии любой конфигурации и сложности.

Существующие математические модели СГПМ

позволяють производити расчет электромагнитного поля, электромагнитных сил, величины индуцированной ЭДС в обмотках СГ. Используя результаты расчетов определяются величины магнитных потоков в СГ, а также значение основных параметров СГ: индуктивные сопротивления рассеивания и реакции якоря. Существуют динамические модели, позволяющие рассчитывать внешнюю характеристику и переходные процессы.

Работа СГ связана не только с постоянной сменой величины нагрузки, но и ее характера. На этапе проектирования целесообразно исследовать внешнюю характеристику генератора  $U_a=f(I_a)$  при различном характере нагрузки: чисто активном R, активно-индуктивном R-L, активно-емкостном R-C. Существующие полевые математические модели не учитывают характер нагрузки, поэтому в данной статье предлагается цепе-полевая математическая модель СГПМ, которая учитывает характер нагрузки.

Основой для разработки данной модели является среда для численного моделирования COMSOL Multiphysics. Цепе-полевая модель отличается от классической тем, что в ней существует взаимосвязь электрической цепи генератора (в том числе и цепи нагрузки) с расчетом электромагнитного поля. Область генератора для расчета электромагнитного поля показана на рис. 2. Результат расчета поля используется для определения электрических величин генератора: тока нагрузки  $I_1$ , напряжения на зажимах генератора  $U_1$ , величины индуцированной ЭДС в фазе обмотки статора  $E_f$ , индуктивностей фазы обмотки  $x_{\sigma a}$ .

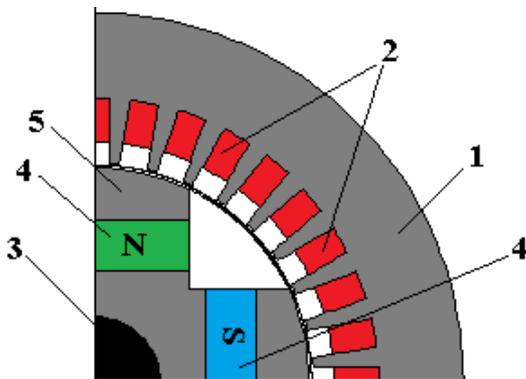


Рис. 2 – Расчетная область исследуемого генератора

На рис. 2: 1 – магнитопровод якоря; 2 – обмотка якоря; 3 – вал; 4 – постоянные магниты; 5 – полюсные наконечники. Полярность постоянных магнитов обозначена соответствующими символами.

Область, показанная на рис. 2 используется для расчета электромагнитного поля и основных электромагнитных величин. Распределение электромагнитного поля в поперечном сечении расчетной области описывается следующими уравнениями:

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times H = J_e, B = \nabla \times A, \nabla \cdot B = 0 \quad (1)$$

где  $J_e$  – плотность токов в обмотке статора, характеризующая режим работы генератора;

$\sigma$  – электропроводность материалов области;

$A$  – векторный магнитный потенциал.

Для области, которая включает в себя воздушный зазор, магнитопровод, вал, полюсные наконечники и обмотку якоря уравнение имеет вид:

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times H - \sigma v \times B = J_e \quad (2)$$

Поле постоянных магнитов рассчитывается следующим образом:

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times \frac{B - B_r}{\mu_0 \mu_r} - \sigma v \times B = J_e \quad (3)$$

где  $B_r$  – остаточная индукция постоянных магнитов;  $v$  – линейная скорость вращения ротора.

Для области, которая включает в себя постоянные магниты.

Особенностью цепе-полевой математической модели является то, что токи в обмотках и нагрузке рассчитываются исходя из величины индуцируемой ЭДС в обмотках СГ  $E_f$ , параметров обмоток: активного  $R_a$  и индуктивного  $L_{\sigma a}$  сопротивления, а также величины и характера нагрузки. Токи в обмотках рассчитываются следующим образом:

$$J_A = \frac{W_1 \cdot I_1}{S_k} e_k \quad (4)$$

где  $W_1$  – количество витков в фазе;

$I_1$  – расчетный ток в фазе;

$S_k$  – эквивалентная площадь сечения катушки фазы в пазу.

Эквивалентная площадь сечения катушки в пазу рассчитывается исходя из выражения:

$$S_k = \frac{U_n \cdot q}{S_n \cdot a} \quad (5)$$

где  $U_n$  – количество элементарных проводников в пазу;

$q$  – площадь поперечного сечения витка фазы;

$S_n$  – площадь паза, отведенная под проводники в модели СГ;

$a$  – количество параллельных ветвей обмотки якоря.

Ток в фазе обмотки СГ рассчитывается исходя из баланса напряжений по следующему выражению:

$$I_1 = \frac{E_f - U_1}{(r_a - jx_{\sigma a})} \quad (6)$$

ЭДС  $E_f$ , индуцированная в обмотке статора СГ, рассчитывается исходя из скорости изменения магнитного потока  $\Phi$ , и количества витков в обмотке статора  $W_1$ :

$$E_f = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

Поскольку модель работает в динамическом режиме, то все искомые величины являются функцией времени на заданном временном интервале который составляет  $2 \cdot T$  ( $T=0,04$  с), плотность токов в каждой фазе в определенный момент времени зависит от скорости вращения ротора:

$$J_a = \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times \frac{B}{\mu_0 \mu_r} - \sigma \cdot v \times B \quad (8)$$

где  $\sigma$  – электропроводность материала обмотки статора (медь).

Плотности токов в обмотке якоря являются искомыми величинами и записываются как функция времени  $t$ :

$$\begin{aligned} J_A &= J_a \cdot \cos(\omega_1 \cdot t), J_B = J_b \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + 2\pi/3), \\ J_C &= J_c \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (9)$$

Структурная электрическая схема исследуемого генератора для одной фазы показано на рис. 3.

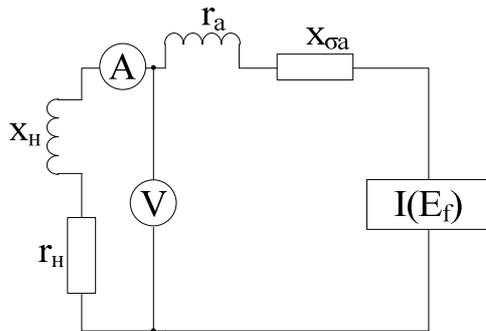


Рис. 3 – Структурная электрическая схема СГ

На рис. 3:  $r_n, x_n$  – активное и индуктивное сопротивление нагрузки;  $r_a, x_{\sigma a}$  – активное и индуктивное сопротивление обмотки якоря;  $I(E_f)$  – элемент цепи-полевой модели, который отвечает за взаимосвязь электромагнитного поля и электрической цепи (обмотки фазы СГ), в котором рассчитывается ток в обмотке исходя из величины индуцированной ЭДС  $E_f$ .

Вращение в программном пакете COMSOL Multiphysics реализуется с помощью физического интерфейса для вращающихся машин. Ротор с магнитами и часть воздушного зазора вращается по отношению к системе координат статора. Ротор и статор выполняются в виде двух отдельных геометрических объектов, на границе которых задается условие непрерывности векторного магнитного потенциала. Для реализации вращения в модели используется автоматический генератор сетки, который перестраивает сетку конечных элементов для каждого временного интервала  $\Delta t$  [7]. Для реализации данного алгоритма вводится дополнительная система координат: цилиндрическая. При этом выражения для определения аксиальной и радиальной составляющих индукции постоянных магнитов в воздушном зазоре в цилиндрической системе координат показаны ниже:

$$B_r = \sum_{n=1}^{\infty} B_r^{(n)}(r) \cdot \cos(p(n\theta - \gamma)) \quad (10)$$

$$B_{\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} B_{\theta}^{(n)}(r) \cdot \sin(p(n\theta - \gamma)) \quad (11)$$

Для определения величины электромагнитного момента используется метод тензора магнитного натяжения [7], который использует результат расчета электромагнитных усилий:

$$n_1 T_2 = -\frac{1}{2} n_1 (E \cdot D) + (n_1 \cdot E) \cdot D^T \quad (12)$$

$$n_1 T_2 = -\frac{1}{2} n_1 (H \cdot B) + (n_1 \cdot E) \cdot B^T \quad (13)$$

где  $E$  – вектор напряженности электрического поля;  $D$  – вектор диэлектрического смещения;  $H$  – напряженность магнитного поля;  $B$  – вектор магнитной индукции;  $n_1$  – нормаль к поверхности.

Исходя из расчета электромагнитных усилий рассчитывается усредненное значение электромагнитного момента методом тензора магнитных натяжений принимает следующий вид [8]:

$$n_1 T_{av} = \frac{1}{2} Re \left( \begin{aligned} &-\frac{1}{2} n_1 (E \cdot D) + (n_1 \cdot E) \cdot D^T - \\ &-\frac{1}{2} n_1 (H \cdot B) + (n_1 \cdot E) \cdot B^T \end{aligned} \right) \quad (14)$$

где  $T_{av}$  – усредненное значение тензора магнитного натяжения.

Решение электромагнитного поля, ЭДС и электромагнитного момента производится на каждом временном интервале  $\Delta t$ . Объединение полученных решений на интервале  $[0 \dots T]$  дает искомые временные зависимости  $E_f(t)$  и  $M_{эм}(t)$ .

Для получения однозначного решения на границах расчетной области задаются граничные условия первого рода [6]:

$$A(x, y, z, t)|_{G_1} = 0 \quad (15)$$

Численное решение поставленной задачи производилось в программном пакете COMSOL Multiphysics. Сетка конечных элементов модели состоит из 31147 треугольных элементов. Среднее время решения поставленной задачи составляет 127 мин и определяется величиной тока нагрузки и ее характером (наиболее долго рассчитывается задача при активно-индуктивной нагрузке и номинальном токе  $\approx 193$  мин.).

На рис. 4 показано распределение электромагнитного поля (фоновая закрашка) и векторного магнитного потенциала (изолинии) при активной нагрузке ( $\cos\phi_1=1$ ) и токе нагрузки  $I_1 \approx 4,25$  А. За основу, при моделировании взято оптимизированную конструкцию СГПМ детально описанную в [1].

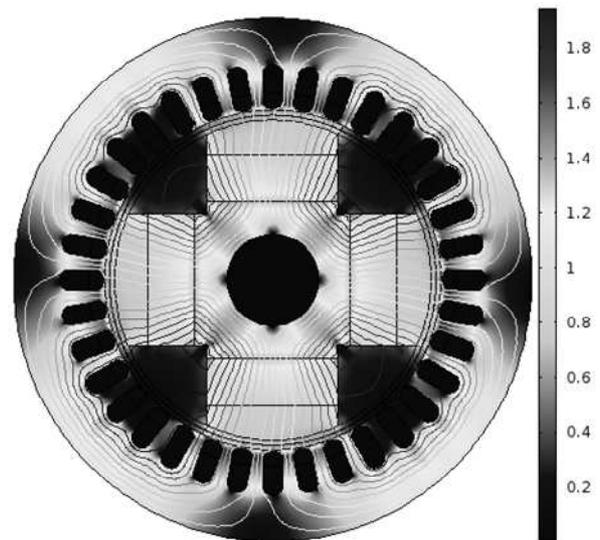


Рис. 4 – Распределение электромагнитного поля при нагрузке

Расчет среднего значения магнитной индукции на участках магнитопровода даёт следующие результаты: среднее значение магнитной индукции в полюсном башмаке  $B_r=0,74$  Тл; среднее значение магнитной индукции в спинке ротора  $B_j=1,39$  Тл; среднее значение магнитной индукции в зубце ротора составляет  $B_z=1,63$  Тл; среднее значение магнитной индукции в ярме статора  $B_a=1,2$  Тл; среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре  $B_g=0,46$  Тл.

Распределение нормальной составляющей индукции вдоль средней линии в воздушном зазоре при токе нагрузки  $I_1 \approx 4,25$  А показано на рис. 5.

На рис. 5 видно искажение формы кривой магнитного потока в воздушном зазоре, возникающее вследствие размагничивающего действия реакции якоря.

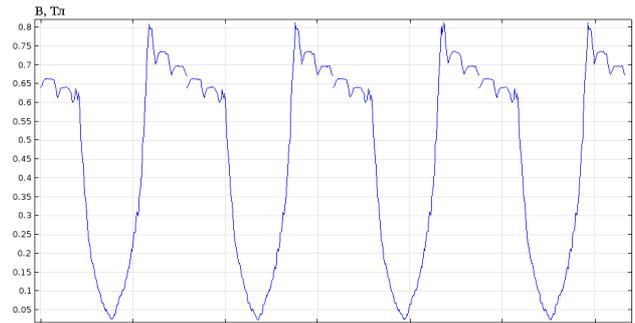


Рис. 5 – распределение индукции в воздушном зазоре при активной нагрузке СГ

На рис. 6 приведено результат расчета мгновенных значений трёхфазной системы напряжений на выходе генератора при активной нагрузке.

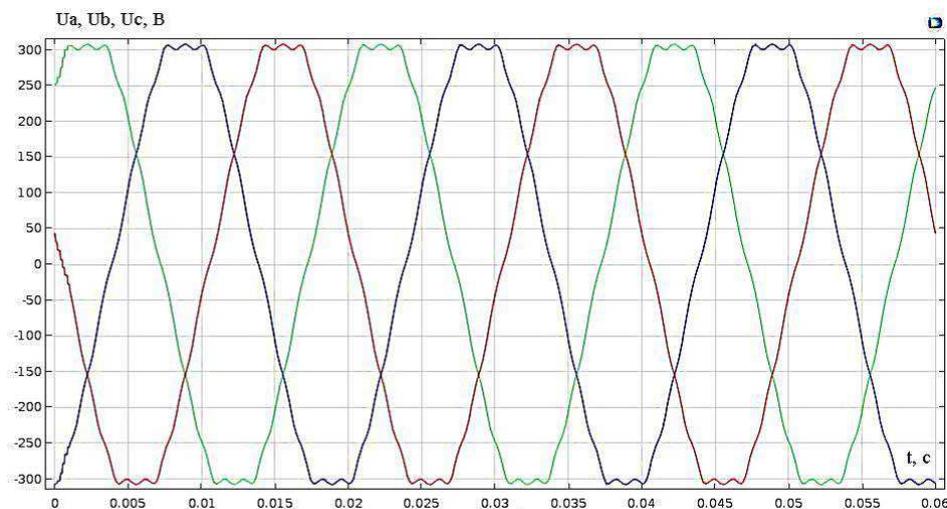


Рис. 6 – Результат расчета трёхфазной системы выходного напряжения генератора

Анализ распределения напряжения во времени и полученного спектра (рис. 7), а также сравнение результата с [1], в котором ЭДС рассчитывалась за формальным выражением показывает, что при цепеполевом подходе в спектре расчетного выходного напряжения отсутствуют высокочастотные составляющие, обусловленные влиянием зубчатости расточки статора.

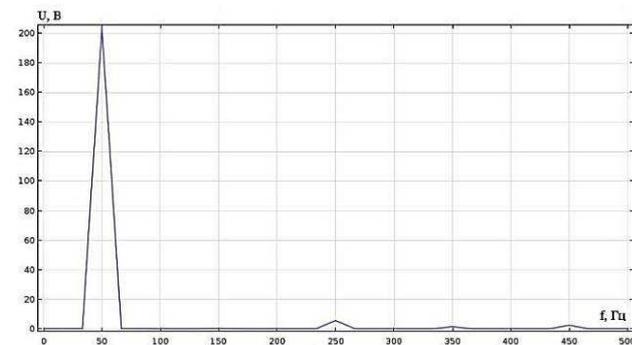


Рис. 7 – Спектральный состав напряжения

В полученном спектре на рис. 7 присутствуют ЭДС 5-й, 7-й и 9-й гармоник. Относительно амплитуды первой гармоники они составляют: 3,2%; 0,75%; 1,25% соответственно для 5-й, 7-й и 9-й

гармоник. Поскольку обмотки исследуемого генератора соединены в звезду, то 3-я гармоника в спектре отсутствует. На рис. 8 приведено результат расчета внешней характеристики генератора для активной, активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузки. При этом принято обоснованная величина коэффициента мощности  $\cos\varphi=0,95$  [9], при которой работает большинство автономных СГ. Из полученных временных зависимостей напряжения на нагрузке и тока (рис. 3) определяется их среднее значение (рис. 9).

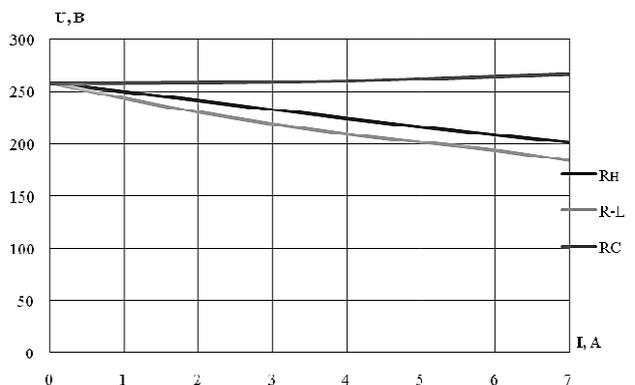
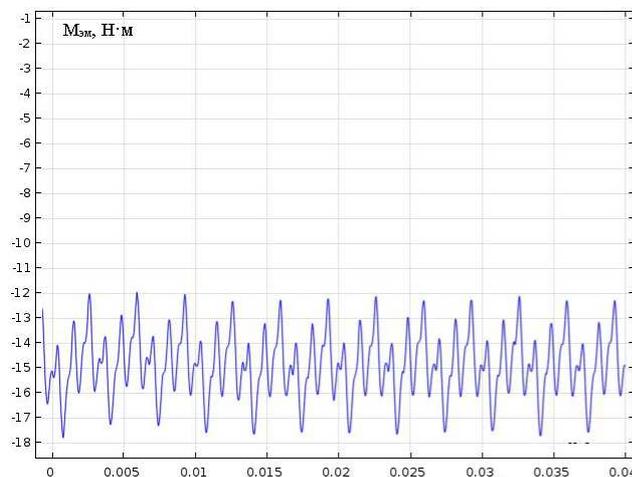


Рис. 8 – Результат расчета внешней характеристики

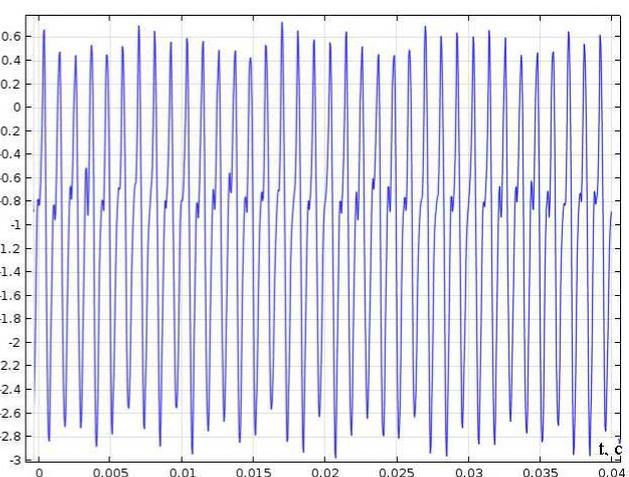
Характер полученных зависимостей соответствует классическому виду внешней характеристики  $I_a=f(U_a)$ . Результат расчета внешней характеристики при активной нагрузке практически полностью совпадает с характеристикой полученной ранее на основании расчета полевой задачи [1]. Это свидетельствует о адекватности разработанной цепе-полевой математической модели и о достоверности полученных результатов.

Фазное напряжение холостого хода во всех случаях составляет  $U_0=258$  В, что составляет 1,17 от номинального фазного напряжения генератора  $U_n=220$  В. Расчеты показывают, что при активной нагрузке и токе якоря  $I_a=4,5$  А напряжение на зажимах генератора составляет  $U_1=225$  В, при дальнейшем повышении тока нагрузки до номинального значение напряжение на обмотке якоря падает до  $U_1=201$  В, что составляет 9% от номинального. При активно-индуктивной нагрузке и  $\cos\varphi=0,95$  напряжение при номинальной нагрузке составляет  $U_1=182$  В, что ниже номинального значения на 18%. При активно-емкостной нагрузке напряжение увеличивается за счет действия продольной подмагничивающей реакции якоря на 21% и составляет  $U_1=268$  В.

Естественная характеристика исследуемого генератора является достаточно жесткой, однако с ростом нагрузки снижение напряжения больше предельно допустимых значений, что требует разработки дополнительных мер по стабилизации внешней характеристики электромагнитным путем. Один из таких способов будет детально рассмотрен в последующих работах, посвященной данной тематике.



а



б

Рис.10 – Электромагнитный момент СГПМ

На рис. 10, а показано зависимость электромагнитного момента исследуемого генератора при нагрузке, а на рис. 10, б на холостом ходу. Среднее значение момента в этом режиме составляет  $M_{эм} \approx 14,5$  Н·м. на холостом ходу момент практически равен нулю. Пульсации момента объясняются наличием зубастости на статоре, а также дискретностью ротора.

**Выводы.** Разработано двухмерную цепе-полевую математическую модель СГПМ, которая отличается

U, I, о.е.

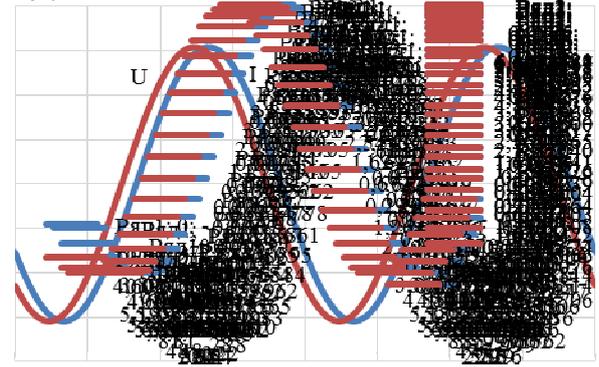


Рис. 9 – Мгновенные значения тока и напряжения на нагрузке при активно-индуктивной нагрузке

Полученные временные зависимости тока и напряжения на нагрузке получены при активно-индуктивной нагрузке и токе якоря  $I_a=4,5$  А. По рис. 9 видно, что временной сдвиг между током и напряжением составляет  $\Delta t \approx 0,0022$  с, что соответствует углу сдвига фаз  $\theta=18^\circ$  и соответствует коэффициенту мощности  $\cos\varphi=0,95$ .

Для оценки адекватности математической модели произведен расчет величины электромагнитного момента и его пульсаций для различных режимов нагрузки исследуемого генератора. В результате получено временные зависимости электромагнитного момента  $M_{эм}(t)$ .

На рис. 10 приведено результаты расчета временной зависимости электромагнитного момента  $M_{эм}(t)$  при  $\cos\varphi=1$ , токе якоря  $I_a=4,5$  А и  $I_a=0$  А.

тем, что позволяет рассчитывать внешнюю характеристику генератора с учетом характера нагрузки. Модель универсальна и рекомендуется к применению для генераторов любой мощности и конфигурации. Результаты расчета коррелируются с предыдущими исследованиями авторов и подтверждаются результатами экспериментов, проведенных ранее.

Расчет внешней характеристики показал, что необходимо разрабатывать комплексные меры по

стабилизации внешней характеристики исследуемого генератора с помощью разработанной цепи-полевой модели. К таким мерам относятся: разработка схемотехнических решений и электромагнитных систем подмагничивания (шунтирования) основного магнитного потока.

**Список литературы:** 1. Чумак В.В. Математическое моделирование генератора с комбинированным возбуждением автономной энергоустановки / В.В. Чумак, М.А. Коваленко, А.И. Пономарев // *Электромеханические и энергосберегающие системы*. – 2015. – №31. – С. 76–84. 2. Чумак В.В. Синхронный генератор с комбинированным возбуждением / В.В. Чумак, А.И. Пономарев // *Энергия – XXI век*. – 2013. – №1. – С. 28–34. 3. Васковський Ю.Н. Моделирование режимов работы тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами / Ю.Н. Васковський, Ю.А. Гайденко, А.Е. Русятинский // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2013. – №5. – С. 19–22. 4. Пономарьов О.І. Повітряний розрахунок моделі магнітоелектричного генератора з магнітним шунтуванням на базі АІР100Л4 в режимі навантаження / О.І. Пономарьов // *Технічна електродинаміка*. – 2015. – №3. – С. 49–54. 5. Чумак В.В. Методика расчета магнитной системы торцевых синхронных электромагнитных генераторов / Е.А. Монахов, В.В. Чумак // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – №1 (90), ч.1 – 2015. – С. 23–26. 6. Васковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. Посіб / Ю.М. Васковський. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 192 с. 7. Tariq Benamimour "Finite Element Modeling and Dynamic Simulation of Nonlinear VRM using MATLAB" / Tariq Benamimour, Amar Bentounsi, Hind Djeghloud, and Ilhem Bouchareb // *IEEE*, 2013. 8. S. Kanerva "Inductance Model for Coupling Finite Element Analysis With Circuit Simulation," / S. Kanerva, S. Seman and A. Arkklio // *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, No. 5, 2005, pp. 1620-1623. 9. E.Monakhov

Axial-flux permanent magnet machine with reduced consumption of active materials / E. Monakhov, V. Chumack // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, №2 (30), 2015 год, с. 83-89.

**Bibliography (transliterated):** 1. Chumak V.V. Matematicheskoe modelirovanie generatora s kombinirovannym возбуждением автономной энергоустановки. V.V. Chumak, M.A. Kovalenko, A.I. Ponomarev. *Elektromehaniicheskie i energosberegajushhie sistemy*. 2015. No 31. 76–84. Print. 2. Chumak V.V. Sinhronnyj generator s kombinirovannym возбуждением. V.V. Chumak A.I. Ponomarev. *Energija – XXI vek*. 2013. No 1. 28–34. Print. 3. Vas'kovskij Ju.N. Modelirovanie rezhimov raboty tjavogovo sinhronnogo dvigatelja s postojannymi magnitami. Ju.N. Vas'kovskij, Ju.A. Gajdenko, A.E. Rusjatinskij. *Elektrotehnika i elektromehaniika*. 2013. No 5. 19–22. Print. 4. Ponomar'ov O.I. Povirochnij rozrahunok modeli magnitoelektrichnogo generatora z magnitnim shuntuvannjam na bazi AIR100L4 v rezhimi navantazhenja. O.I. Ponomar'ov. *Tehnichna eletrodinamika*. 2015. No 3. 49–54. Print. 5. Chumak V.V. Metodika rascheta magnitnoj sistemy torcevyh sinhronnyh magnitoelektricheskih generatorov. E.A. Monahov, V.V. Chumak. *Visnik Kremenčuc'kogo nacional'nogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo*. No 1 (90), Vol.1. 2015. 23–26. Print. 6. Vas'kovskij Ju.M. Pol'ovij analiz elektrichnih mashin: Navch. Posib / Ju.M. Vas'kovskij. – Kiev: NTUU "KPI", 2007. – 192 p. Print. 7. Tariq Benamimour "Finite Element Modeling and Dynamic Simulation of Nonlinear VRM using MATLAB" Tariq Benamimour, Amar Bentounsi, Hind Djeghloud, and Ilhem Bouchareb. *IEEE*, 2013. Print. 8. S. Kanerva "Inductance Model for Coupling Finite Element Analysis With Circuit Simulation" S. Kanerva, S. Seman and A. Arkklio. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, No. 5, 2005, pp. 1620-1623. Print. 9. E. Monakhov Axial-flux permanent magnet machine with reduced consumption of active materials. E.Monakhov, V. Chumack. *Elektromehanični i energozberigajuchi sistemi*. No 2 (30). 2015. 83-89.

Поступила (received) 05.07.2014



**Чумак Вадим Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины "Киевский Политехнический Институт", доцент кафедры электромеханики, тел. +38(067) 505-19-89; e-mail: chumack\_kpi@ukr.net.

**Chumack Vadim Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", tel.: +38(067) 505-19-89; e-mail: chumack\_kpi@ukr.net.



**Коваленко Михаил Анатольевич** – кандидат технических наук, ассистент, Национальный технический университет Украины "Киевский Политехнический Институт", ассистент кафедры электромеханики, тел. +38(067) 656-36-51; e-mail: kovalenko\_ma@i.ua.

**Kovalenko Mykhailo Anatolijovuch** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), assistant, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", tel.: +38(067) 656-36-51; e-mail: kovalenko\_ma@i.ua.



**Пономарев Алексей Игоревич** – Национальный технический университет Украины "Киевский Политехнический Институт", инженер, тел. +38(067) 536-50-62. e-mail: aiponom@ukr.net.

**Ponomarev Oleksiy Igorevich** – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", engineer, tel.: +38(067) 536-50-62. e-mail: aiponom@ukr.net.