

УДК 621.313.323:004.418

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ОБРАТНО В ЭЛЕКТРОСЕТЬ

¹Субботина В.А., ^{2,3}Тюленев М.Е., ^{3,4}Чабанов Е.А.

¹АО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, e-mail: lera.subbotina.2013@bk.ru;

²ЗАО «НИПО», Пермь, e-mail: m.tyulenyov@gmail.com;

³ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, e-mail: ceapb@mail.ru;

⁴ПФ ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», Пермь, e-mail: ceapb@mail.ru

При проведении испытаний синхронных машин с целью определения их работоспособности возникает необходимость утилизации большого количества механической или электрической энергии, получаемой от испытываемых устройств. При небольших мощностях генерации электроэнергия, вырабатываемая синхронным генератором, может быть преобразована в тепло. При возрастании мощности испытываемых устройств такой способ утилизации электроэнергии становится затратным и трудно реализуемым. Становится очевидным желание каким-либо образом аккумулировать или возвращать эту энергию, т.е. передавать выработанную электроэнергию обратно в энергосеть общего пользования для питания других потребителей. Таким образом, исключаются затраты на электроснабжение этих испытуемых потребителей от поставщика электроэнергии, и решается вопрос утилизации электроэнергии, получаемой от испытываемой машины. Статья посвящена моделированию испытаний синхронного двигателя с рекуперацией электроэнергии обратно в сеть посредством синхронного генератора в графической среде имитационного моделирования Simulink интерактивной среды программирования MATLAB.

Ключевые слова: синхронный двигатель, синхронный генератор, испытания электромеханических преобразователей, рекуперация электроэнергии в сеть

SIMULATION OF TESTS OF A SYNCHRONOUS MOTOR WITH REGENERATIVE POWER BACK INTO THE POWER GRID

¹Subbotina V.A., ^{2,3}Tyulenev M.E., ^{3,4}Chabanov E.A.

¹AO «Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company», Perm, e-mail: lera.subbotina.2013@bk.ru;

²ZAO «NIPO», Perm, e-mail: m.tyulenyov@gmail.com;

³Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: ceapb@mail.ru;

⁴Volga state university of water transport», Perm, e-mail: ceapb@mail.ru

When testing synchronous machines in order to determine their efficiency it is necessary to waste a large amount of mechanical or electrical energy obtained from the test device. At low powers of generation electricity generated by synchronous generator can be converted into heat. With increasing power of test devices such method of disposal of electricity becomes a costly and unwieldy. It becomes obvious desire in any way to accumulate or to return this energy, ie, transmit generated electricity back into the power grid for other consumers of power. Thus, there are excluded costs for electricity of these test consumers from the electricity supplier and there are solved the problem of electricity utilization obtained from the test machine. The article is devoted to modeling of testing synchronous motor with regenerative power back into the power grid by synchronous generator in the graphical environment of simulation of Simulink of interactive programming environment of MATLAB.

Keywords: synchronous motor, synchronous generator, tests of electromechanical converters, regenerative power back into the power grid

Проведение испытаний электрических машин необходимо на всех этапах производственного процесса. Испытание – это проверка пригодности машины к определенной работе [1].

На испытательных стендах используются различные преобразовательные агрегаты для нагружения электрических машин. В данной работе получена модель стенда, нагрузочную систему которого имеет промежуточную систему «генератор-двигатель» (рис. 1).

В таком устройстве происходит рекуперация энергии, потребляемой двигателем из сети, обратно в сеть. Испытываемый син-

хронный двигатель (СД) нагружается с помощью генератора постоянного тока (ГПТ).

Для построения имитационной модели стенда необходимо математически описать электрические машины, входящие в состав устройства.

Для анализа используется математическое описание СД в единой системе координат $d-q$, связанной с ротором. Такая модель при постоянном насыщении магнитной цепи имеет постоянные коэффициенты индуктивностей, что значительно увеличивает быстродействие расчета и упрощает анализ [2].

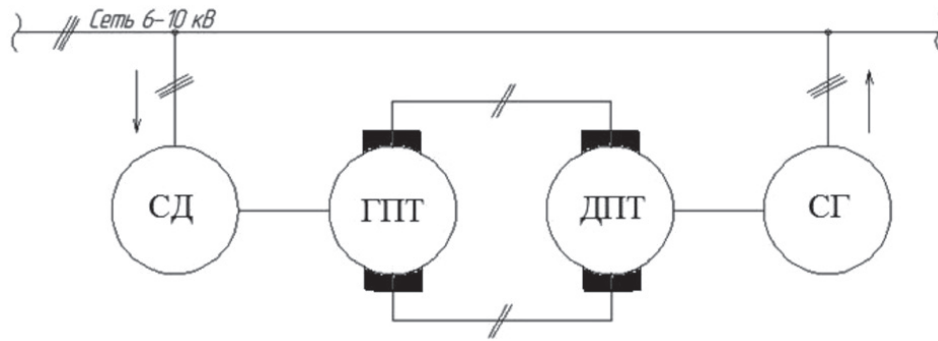


Рис. 1. Схема испытательного стенда синхронного двигателя

$$\begin{cases} u_d = d\Psi_d / dt - \omega \cdot \Psi_q + R_c \cdot i_d, \\ u_q = d\Psi_q / dt + \omega \cdot \Psi_d + R_c \cdot i_q, \\ u_f = d\Psi_f / dt + R_f \cdot i_f, \\ 0 = d\Psi_{yd} / dt + R_{yd} \cdot i_{yd}, \\ 0 = d\Psi_{yq} / dt + R_{yq} \cdot i_{yq}, \\ d\omega / dt = (m - m_c) / J_\Sigma, \\ d\theta / dt = \omega_0 - \omega, \\ m = \Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d. \end{cases} \quad (1)$$

В системе (1) используются сверху вниз уравнения баланса напряжений статора (u_d , u_q), уравнения баланса напряжений ротора (обмотки возбуждения u_f и успокоительной обмотки), уравнение движения, уравнение, описывающее угол нагрузки θ и формула вычисления электромагнитного момента m .

Значения токов находим из векторного уравнения

$$\vec{\Psi} = \vec{L} \times \vec{I}, \quad (2)$$

где потокосцепление, токи и индуктивности представлены в виде трех матриц:

$$\vec{\Psi} = \begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_{yd} \\ \Psi_{yq} \end{pmatrix}, \quad \vec{I} = \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_{yd} \\ i_{yq} \end{pmatrix},$$

$$\vec{L} = \begin{pmatrix} L_d & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & L_{aq} \\ L_{ad} & 0 & L_f & L_{ad} & 0 \\ L_{ad} & 0 & L_{ad} & L_{yd} & 0 \\ 0 & L_{aq} & 0 & 0 & L_{yq} \end{pmatrix}.$$

Напряжение статора определяется проекциями изображающего вектора на координатные оси:

$$u_q = U_c \cdot \cos(\theta), \quad u_d = -U_c \cdot \sin(\theta). \quad (3)$$

Для синхронной машины (СМ) входной величиной будет момент сопротивления m_c , а выходной – скорость вращения ω . Параметры используются в системе относительных единиц. Синхронный генератор имеет аналогичную математическую модель, что и СД.

Для анализа используется математическое описание машины постоянного тока (МПТ) в естественной фазной системе координат. Уравнения МПТ строятся аналогично. Две машины мы объединили в один блок, поэтому система уравнений для МПТ имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{b1}}{dt} = U_{b1} - R_{b1} \cdot i_{b1}, \\ \frac{d\Psi_{b2}}{dt} = U_{b2} - R_{b2} \cdot i_{b2}, \\ \frac{dj_\alpha}{dt} = \frac{C_{e1} \cdot \omega \cdot \Psi_{b1} - C_{e2} \cdot \omega \cdot \Psi_{b2} - i_\alpha \cdot (R_{\alpha1} + R_{\alpha2})}{L_1 + L_2}, \\ m_{e1} = C_{m1} \cdot \Psi_{b1} \cdot i_\alpha, \quad m_{e2} = C_{m2} \cdot \Psi_{b2} \cdot i_\alpha. \end{cases} \quad (4)$$

В системе (4) используются сверху вниз уравнения баланса напряжений обмотки возбуждения ГПТ и двигателя постоянного тока (ДПТ) (U_{b1} и U_{b2}), уравнение баланса напряжения в контуре якоря, формулы вычисления электромагнитных моментов ГПТ и ДПТ (m_{e1} и m_{e2}) [3].

Входной величиной здесь является скорость вращения ω , а выходной электромагнитный момент m_e . Параметры используются в системе физических единиц. Но для того чтобы можно было СМ и МПТ соединить между собой, входные и выходные величины переводятся с помощью базовых величин в нужную систему [4].

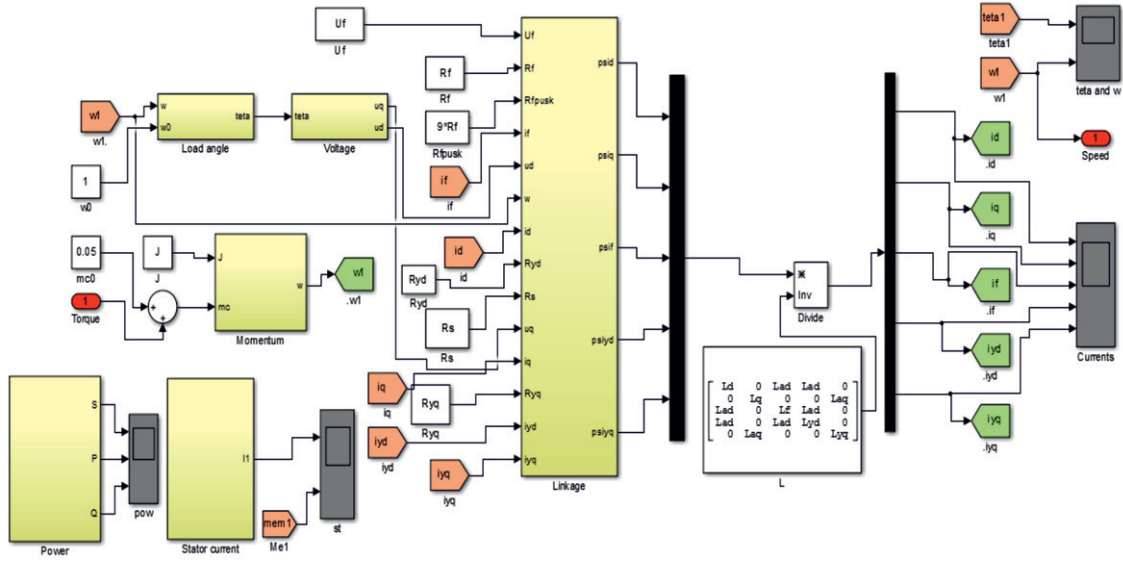


Рис. 2. Схема модели СД в MatLab

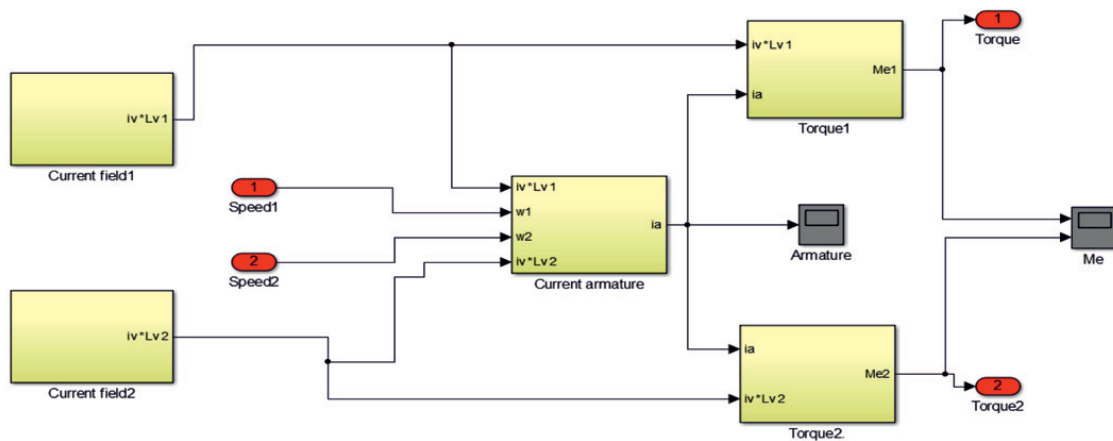


Рис. 3. Схема модели промежуточной системы «генератор-двигатель»

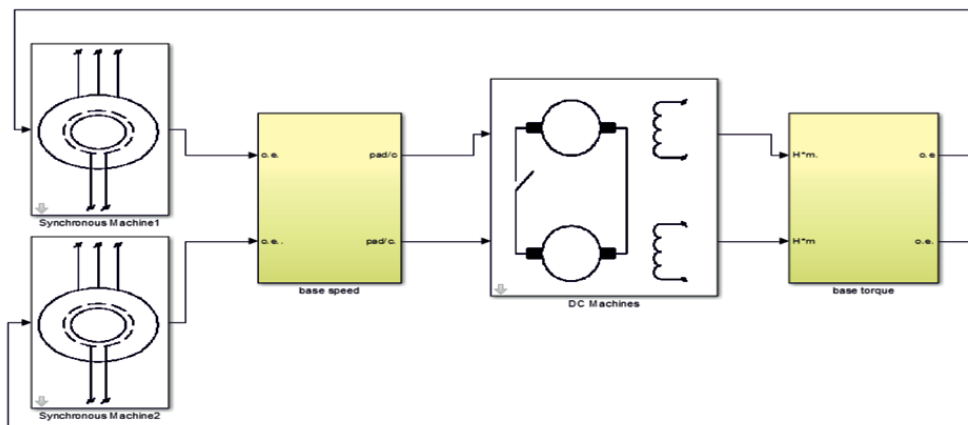


Рис. 4. Схема модели испытательного стенда СД в MatLab

Базовая скорость вращения

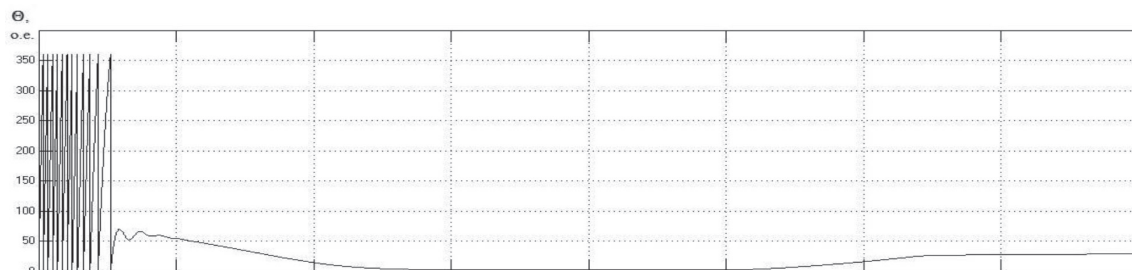
$$\omega_6 = n_n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \text{ рад/с.}$$

Базовый момент

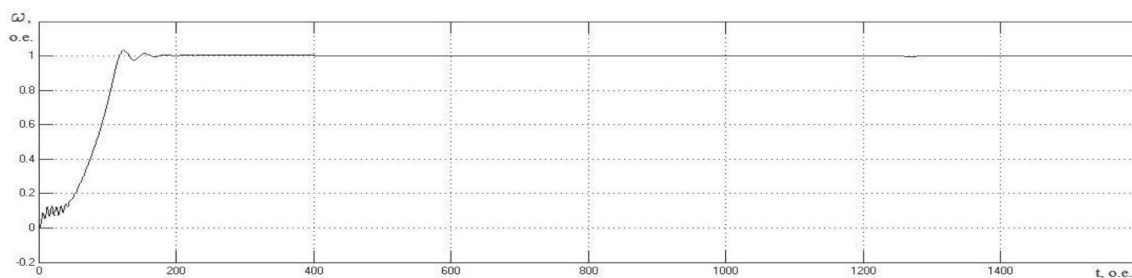
$$M_6 = P_6 / \omega_6 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

На рис. 2 представлена модель СД и рис. 3 – модель промежуточной системы генератор-двигатель.

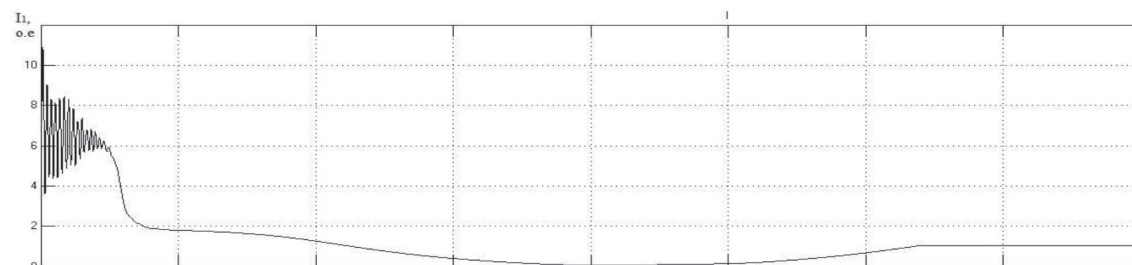
Для получения модели стенда необходимо объединить полученные блоки машин в одну схему (рис. 4).



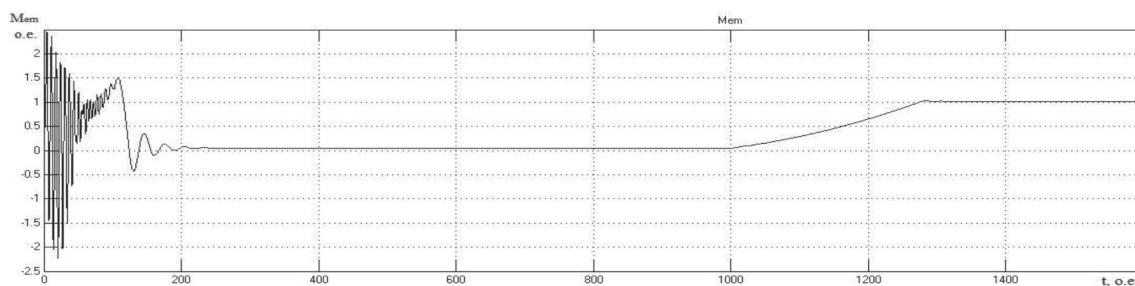
а)



б)



в)



г)

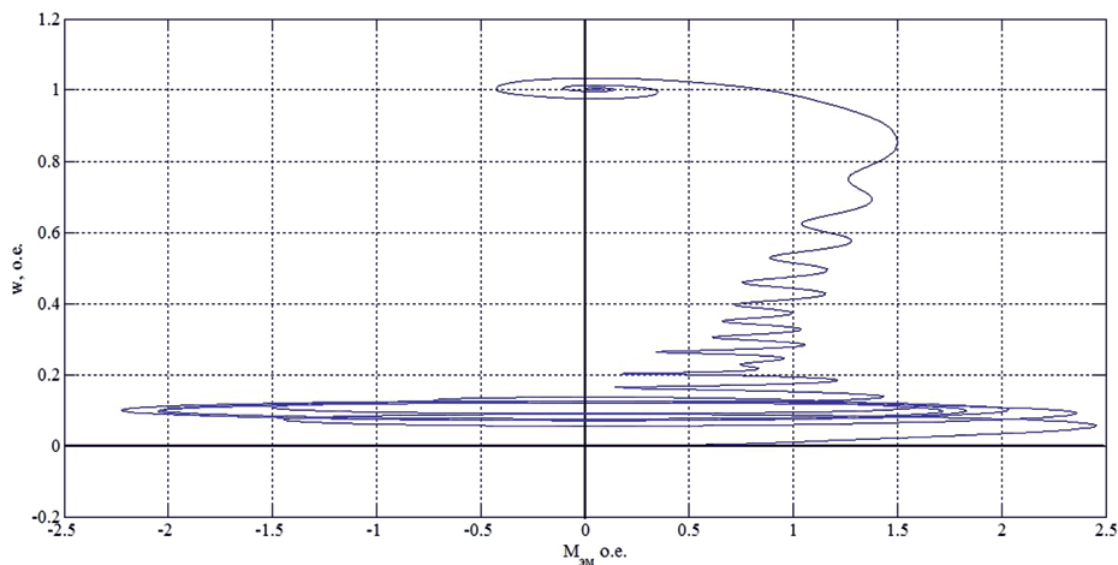
Рис. 5. Осциллограммы: а – угол нагрузки; б – скорость СД; в – ток статора; г – электромагнитный момент

Модели получены с помощью имитационного моделирования в Simulink-модели программного пакета MATLAB [5].

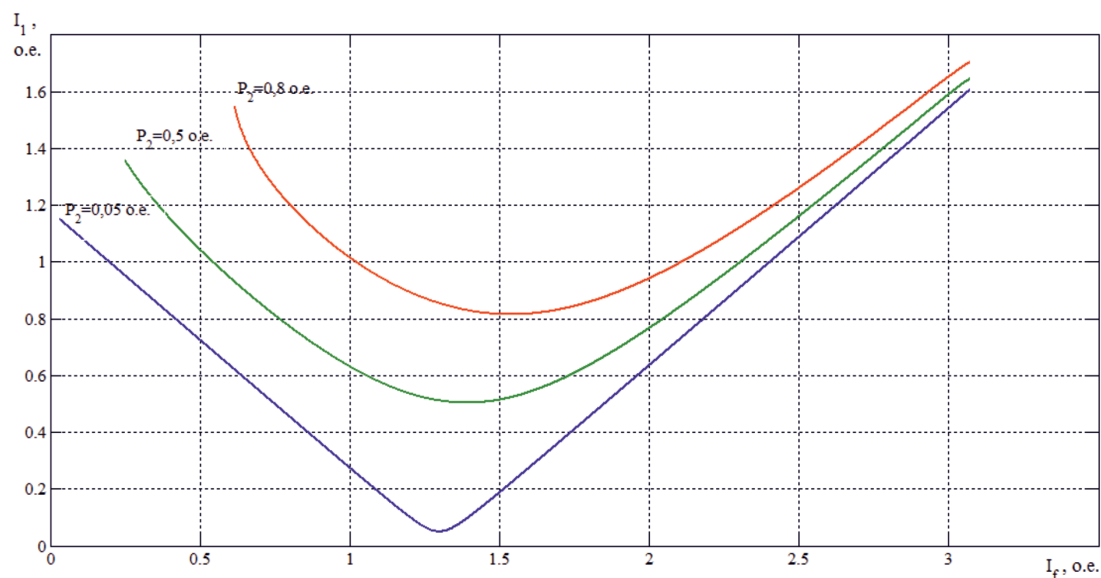
Так как параметры машин используются в разных единицах измерения, то необходимы еще два блока, которые осуществляли бы переход из одной системы в другую. На рис. 4 это блоки «base speed» и «base

torque». Для удобства каждая машина имеет свое окно параметров, которое открывается при нажатии на блок машины.

Данная модель позволяет получить различные графические зависимости. Для иллюстрации использования модели рассмотрим асинхронный пуск СД и нагрузочный режим.



а)



б)

Рис. 6. Результаты математического моделирования: а – динамическая механическая характеристика СД; б – U-образная характеристика СМ

В установившемся режиме в момент времени, равный $t = 1000$ о.е., плавно увеличиваем напряжение возбуждения на ГПТ. Тем самым плавно увеличивается угол нагрузки θ , ток статора I_1 , электромагнитный момент M_{em} (рис. 5). Как видно, при набросе нагрузки от нуля до номинальной скорость вращения остается неизменной.

Также имитационная модель стенда позволяет получить не только временные диаграммы, но и графики одного параметра в функции другого. Например, динамическую механическую характеристику $\omega = f(M_{em})$ (рис. 6, а). Она показывает связь между мгновенными значениями момента и скорости машины в процессе перехода из одного равновесного состояния в другое.

На рис. 6, а четко виден колебательный процесс скорости и момента в виде концентрических окружностей с уменьшающимся радиусом по мере затухания колебаний скорости и момента.

На рис. 6, б представлена зависимость тока якоря от тока возбуждения $I_1 = f(I_f)$ при различных значениях мощностей. Току возбуждения $I_f \approx 1,3$ о.е. соответствует режим работы при $\cos \varphi = 1$. На графике видны минимальные значения тока возбуждения, для каждой характеристики они разные.

Таким образом, моделирование позволило проверить правильность работы стенда. Подтверждением тому являются полученные графики, не противоречащие теории. Полученную Simulink-модель можно использовать для испытаний СМ различных мощностей. Необходимо только подобрать СМ и МПТ соизмеримой мощности. Также отметим, что исследования не ограничиваются построением вышеизложенных графических зависимостей. Возможен анализ переходных процессов СД при пониженном напряжении сети, анализ переходных процессов и получение

нагрузочных характеристик синхронного генератора (СГ) и т.д.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ № 13.832.2014/К «Разработка методологических основ адаптивного управления автономными и неавтономными газотурбинными электростанциями мощностью до 25 МВт».

Список литературы

1. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. Учеб. для вузов, 2-е ред. – М: Высшая школа, 2000. – 255 с.: ил.
2. Субботина В.А. Исследование пуска синхронного двигателя при пониженном напряжении в системе d-q / Субботина В.А., Тюленев М.Е. // Материалы краевой научно-технической конференции «Автоматизированные системы управления и информационные технологии», с. 182–191, 21 мая 2014.
3. Сипайлов Г.А. Электрические машины (специальный курс). / Сипайлов Г.А. и др. // Учеб. для вузов по спец. «Электрические машины». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1987. – 287 с.
4. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. / Копылов И.П., Клоков В.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. // 3-е изд., испр. и доп. – М.: Выш. шк., 2002. – 757 с., ил.
5. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. Учебно-справочное пособие. Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.

References

1. Goldberg O.D. Ispytaniya jelektricheskikh mashin. Ucheb. dlja vuzov, 2-e red. M: Vysshaja shkola, 2000. 255 p.: il.
2. Subbotina V.A. Issledovanie puskа sinhronnogo dvigatelja pri ponizhenom naprjazhenii v sisteme d-q / Subbotina V.A., Tjulenev M.E. // Materialy kraevoj nauchno-tehnicheskij konferencii «Avtomatizirovannye sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii», pp. 182–191, 21 maja 2014.
3. Sipajlov G.A. Jelektricheskie mashiny (specialnyj kurs). / Sipajlov G.A. i dr. // Ucheb. dlja vuzov po spec. «Jelektricheskie mashiny». 2-e izd., pererab. i dop. M.: Vysshaja shkola, 1987. 287 p.
4. Kopylov I.P. Proektirovanie jelektricheskikh mashin. / Kopylov I.P., Klokov V.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. // 3-e izd., ispr. i dop. M.: Vyssh. shk., 2002. 757 p., il.
5. Chernyh I.V. SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozhenij. Uchebno-spravoch-noe posobie. Pod obshh. red. k.t.n. V.G. Potemkina. M.: DIALOG-MIFI, 2003. 496 p.