

УДК 621.313.322

И.А. Крылова^{1,2}, Б.В. Кавалеров², Е.А. Чабанов^{2,3}¹АО «ЭНЕРГОСЕРВИС», Пермь, Россия²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия³Волжский государственный университет водного транспорта, Пермь, Россия

МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Объектом исследования в данной статье является математическая модель синхронного генератора. Целью данной статьи является совершенствование математической модели синхронного генератора, описанной уравнениями Парка–Горева для электрической идеализированной машины. Основными используемыми методами в данной статье являются методы расчета индуктивностей синхронной машины по известным соотношениям. Полученные индуктивности корректируются на каждом шаге расчета при построении кривых переходных процессов согласно изменению тока намагничивания. Исходными данными здесь является зависимость, полученная с помощью аппроксимации опытных данных характеристики холостого хода. В процессе моделирования сравнивались две модели синхронного генератора, одна – на основе уравнений Парка–Горева для идеализированной электрической машины, другая – аналогичная, но с добавлением предложенного узла насыщения магнитной цепи. Модель синхронного генератора построена в среде имитационного моделирования MatLab/Simulink. Полученные результаты моделирования показывают расхождение между полученными кривыми переходных процессов как в статических, так и динамических режимах, что коррелируется с теоретическими сведениями. Предложенная модель может быть полезна при анализе работы системы автоматического управления синхронного генератора для получения кривых переходных процессов, приближенных к реальным экспериментальным данным.

Ключевые слова: синхронный генератор, газотурбинная установка, модель, насыщение.

I.A. Krylova^{1,2}, B.V. KavaleroV², E.A. Chabanov^{2,3}

¹JSC «ENERGOSERVIS», Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³Volga state university of water transport, Perm, Russian Federation

MODEL OF SYNCHRONOUS GENERATOR WITH ACCOUNTING OF THE MAGNETIC CIRCUIT SATURATION IN THE MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT FOR RESEARCH OF AUTOMATIC CONTROLLER

The article deals with mathematical model of a synchronous generator. The purpose of this article is to improve the mathematical model of a synchronous generator, described by the Park-Gorev equations for an electric idealized machine. The main methods used in this article are the methods for calculating the inductances of a synchronous machine using known relationships. In the modeling transients the received inductances are corrected at each step of the calculation according magnetization current change. The initial data is the dependence obtained by approximating the experimental data of the no-load test characteristic. In the modeling two models of a synchronous generator were compared, one of them on the basis of the Park-Gorev equations for an idealized electric machine, other model similar, but with the addition of the proposed submodel of saturation of the magnetic circuit. The synchronous generator model was obtained in the MatLab / Simulink simulation environment. The results of the simulation are correlated with the theoretical positions. The resulting transients are mismatched in either statics and dynamics. The proposed model can be useful in analyzing the operation of a synchronous generator automatic control system to obtain close to real experimental data transients.

Keywords: synchronous generator, gas turbine power plant, model, saturation.

Введение. Одной из главных проблем развития добывающей отрасли является факт удаленности месторождений от электрических сетей. В случае необходимости наращивания производственных мощностей предприятия при традиционном энергообеспечении, возникает множество организационных, финансовых и технических трудностей, поскольку часто необходимы прокладка новых линий электропередач, строительство новых трансформаторных подстанций, перекладка теплотрасс и т.п. В свою очередь, стоимость прокладки энергокоммуникаций и подключение к государственным сетям для предприятия могут вылиться в сумму, сравнимую или превосходящую стоимость строительства собственной электростанции [1].

По этим причинам в современных условиях весьма значительной становится роль объектов автономной энергетики. Особое внимание в России в наше время уделяется газотурбинным установкам (ГТУ), предназначенным для привода синхронных генераторов в составе мини-электростанций мощностью от 2,5 до 20 МВт и более [2]. Следует

отметить, что у нефтегазодобывающих компаний имеется возможность использования доступного природного газа с низкой себестоимостью в качестве топлива для электростанции [3]. Поэтому для подобных предприятий экономически обоснованно применение газотурбинных электростанций (ГТЭС): они имеют большой КПД (при когенерации пара до 90 %) [4] и меньшие габариты по сравнению с котлотурбинными установками такой же мощности.

Для управления режимами ГТЭС служит система автоматического управления (САУ). Объект управления имеет сложную структуру, обладает перекрестными связями и непрост для получения требуемых показателей качества управления. САУ ГТЭС включают в себя САУ ГТУ и систему управления синхронным генератором, а также много других составных частей [5].

Для исследования динамики синхронного генератора наиболее часто применяются математические модели на основе уравнений Парка–Горева [6], однако данная математическая модель генератора является его идеализацией, поэтому при составлении уравнений и рассмотрении переходных процессов используют общепринятые ограничения и допущения, связанные с «идеализированным» объектом. В связи с упрощением объекта возникает задача настройки математической модели на реальный объект, суть которой состоит в определении таких значений параметров, которые дадут результат, максимально приближенный к экспериментальным данным [7].

Целью данной статьи является развитие предложенной в [8] модели синхронного генератора, выполненной без учета насыщения магнитной цепи. Новая модель строится на базе предшествующей с добавлением узла учета насыщения.

Модель электрогенератора составлена для явнополюсной синхронной машины. Для описания электромеханических процессов используется система координат d, q , представляющая собой две взаимно перпендикулярные оси, жестко связанные с ротором электрической машины [6]. Узел насыщения содержит в себе параметры индуктивностей, рассчитанных согласно принятым методикам [9, 10 и др.].

1. Порядок расчета параметров машины. Для учета насыщения используется характеристика холостого хода генератора ТК-4-2УХЛ, отражающая зависимость напряжения на внешних зажимах синхронного генератора U от тока обмотки возбуждения I_f при холостом ходе и имеет следующий вид (таблица).

Характеристика холостого хода генератора ТК-4-2УХЛ

| | | | | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U, В$ | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 | 6300 | 7000 | 7500 | 8200 |
| $I_f, А$ | 48 | 55 | 64 | 76 | 82 | 93 | 107 | 116 | 143 | 172 | 240 |

Данная характеристика холостого хода позволяет найти зависимость индуктивности L_{adf} (8) от тока обмотки возбуждения i_f . Такую зависимость можно представить полиномом 3-й степени, полученным с помощью аппроксимации опытных данных (рис. 1).

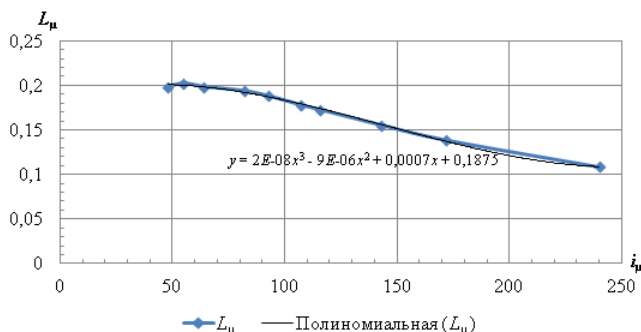


Рис. 1. Зависимость $L_{\mu} = F(i_{\mu})$ для ТК-4-2УХЛ

Для рассматриваемой машины проекции тока намагничивания i_{μ} в осях ротора d, q определяются согласно выражениям (1), (2):

$$I_{\mu d} = I_f + I_d \cdot \frac{I_{f\beta}}{I_H} + I_D \cdot \frac{I_{f\beta}}{I_H}, \quad (1)$$

$$I_{\mu q} = I_q \cdot \frac{I_{f\beta}}{I_H} + I_Q \cdot \frac{I_{f\beta}}{I_H}, \quad (2)$$

где $I_{\mu d}$, $I_{\mu q}$ – проекции тока намагничивания i_{μ} в осях ротора d, q ; I_d , I_q – проекции тока статора в осях ротора d, q ; I_f – ток возбуждения; $I_{f\beta}$ – ток возбуждения базовый; I_H – ток статора базовый; I_D , I_Q – проекции тока демпферных контуров в осях ротора d, q .

Из найденной выше зависимости $L_{\mu} = F(i_{\mu})$ определим индуктивности $L_{\mu d}$ и $L_{\mu q}$ как $L_{\mu d(q)} = F(i_{\mu d(q)})$.

В процессе расчета переходных процессов индуктивности взаимной индукции корректируются на каждом шаге интегрирования в соответствии с расчетными значениями токов намагничивания:

$$L_{adf} = F(i_{\mu d}). \quad (3)$$

Индуктивность L_{adf} рассчитана для неприведенной обмотки возбуждения. Поэтому при формировании матрицы индуктивностей используются коэффициенты приведения, определяемые соотношением базовых токов статора и ротора (Гн):

$$L_{ad} = \frac{L_{adf}}{\frac{I_H}{I_{fB}}}, \quad (4)$$

где L_{ad} – индуктивность по продольной оси.

Величина L_{fad} является индуктивностью, связывающей потокосцепление ротора Ψ_f и токи I_d и I_D , приведенные к статору (Гн):

$$L_{fad} = \frac{I_{fB} \cdot z_{fB}}{I_H \cdot \omega} \cdot x_{ad}, \quad (5)$$

где z_{fB} – сопротивление ротора базисное; ω – синхронная угловая частота; x_{ad} – индуктивное сопротивление по продольной оси.

Синхронную индуктивность (Гн) по продольной оси d определим как

$$L_d = \frac{x_d \cdot z_B}{\omega}, \quad (6)$$

где L_d – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси d ; x_d – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси d , z_B – сопротивление статора базисное.

Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси x_d связано с величиной индуктивного сопротивление по продольной оси x_{ad} (о.е.):

$$x_d = x_{ad} + x_s, \quad (7)$$

где x_s – ндуктивное сопротивление рассеяния, $x_s = 0,0834$.

Величина индуктивного сопротивления (о.е.) по продольной оси определится как

$$x_{ad} = \frac{L_{ad} \cdot \omega}{z_B}. \quad (8)$$

Индуктивность ротора (Гн) по оси d определится как

$$L_f = \frac{x_f \cdot z_{fB}}{\omega}, \quad (9)$$

где x_f – индуктивное сопротивление ротора, определяемое следующим выражением (о.е.):

$$x_f = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x'_d}, \quad (10)$$

где x'_d – продольное переходное реактивное сопротивление для положительного следования фаз, $x'_d = 0,2337$.

Индуктивность демпферного контура (Гн) по оси d определится как

$$L_D = \frac{x_D \cdot Z_B}{\omega}, \quad (11)$$

где x_D – индуктивное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси.

Индуктивное сопротивление демпферной обмотки (о.е.) по продольной оси определяется согласно выражению

$$x_D = \frac{x_{ad}^2 \cdot (x_f - 2 \cdot x_{ad} + x_d - x''_d)}{x_f \cdot (x_d - x''_d) - x_{ad}^2}, \quad (12)$$

где x''_d – продольное сверхпереходное реактивное сопротивление для положительного следования фаз, $x''_d = 0,139$.

Выражения (3)–(12) для расчета матрицы индуктивности справедливы и для поперечной оси, так как рассматриваемая машина является неявнополюсной, а значит, характеризуется магнитной симметрией. В итоге система дифференциальных и алгебраических уравнений синхронного генератора при учете насыщения синхронного генератора перепишется следующим образом:

$$\begin{cases} u_d = -\psi_q \cdot \omega - d\psi_d/dt - i_d \cdot r; \\ u_q = \psi_d \cdot \omega - d\psi_q/dt - i_q \cdot r; \\ u_f = d\psi_f/dt - i_f \cdot r_f; \\ 0 = d\psi_D/dt + i_D \cdot r_D; \\ 0 = d\psi_Q/dt + i_Q \cdot r_Q; \\ d\gamma/dt = \omega; \\ M = \psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d. \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} \Psi_d(I_{\mu d}) \\ \Psi_D(I_{\mu d}) \\ \Psi_f(I_{\mu d}) \\ \Psi_q(I_{\mu q}) \\ \Psi_Q(I_{\mu q}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d(I_{\mu d}) & L_{ad}(I_{\mu d}) & L_{adf}(I_{\mu d}) & 0 & 0 \\ L_{ad}(I_{\mu d}) & L_D(I_{\mu d}) & L_{adf}(I_{\mu d}) & 0 & 0 \\ L_{fad}(I_{\mu d}) & L_{fad}(I_{\mu d}) & L_f(I_{\mu d}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q(I_{\mu q}) & L_{aq}(I_{\mu q}) \\ 0 & 0 & 0 & L_{aq}(I_{\mu q}) & L_Q(I_{\mu q}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_d \\ I_D \\ I_f \\ I_q \\ I_Q \end{pmatrix}. \quad (14)$$

2. Описание модели узла насыщения. Узел учета насыщения реализован в подмодели, показанной на рис. 2.

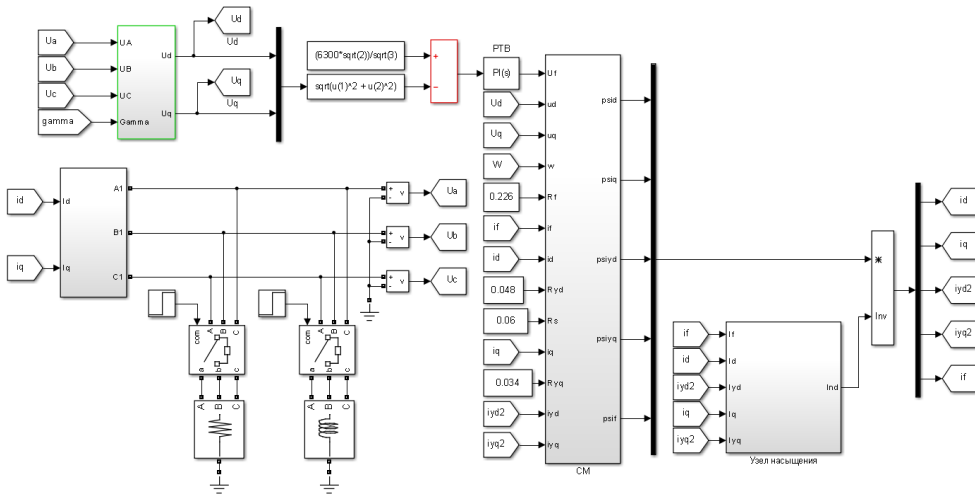


Рис. 2. Узел учета насыщения в составе модели

Здесь входными параметрами являются токи статора I_d , I_q , I_D , I_Q , а также ток обмотки возбуждения I_f . Намагничивающие токи $I_{\mu d}$, $I_{\mu q}$ и соответствующие индуктивности как $L_{\mu d}$, $L_{\mu q}$ определяются согласно (1), (2), (3) на каждом шаге расчета. По приведенным ранее выражениям (3)–(12) на каждом шаге интегрирования осуществляется

расчет оставшихся индуктивностей матрицы (14) L_{ad} , L_{fad} , L_d , L_f , L_D , L_{aq} , L_q , L_Q (рис. 3). Итоговый вид матрица (9) получает путем конкатенации векторов, состоящий из найденных индуктивностей (рис. 4).

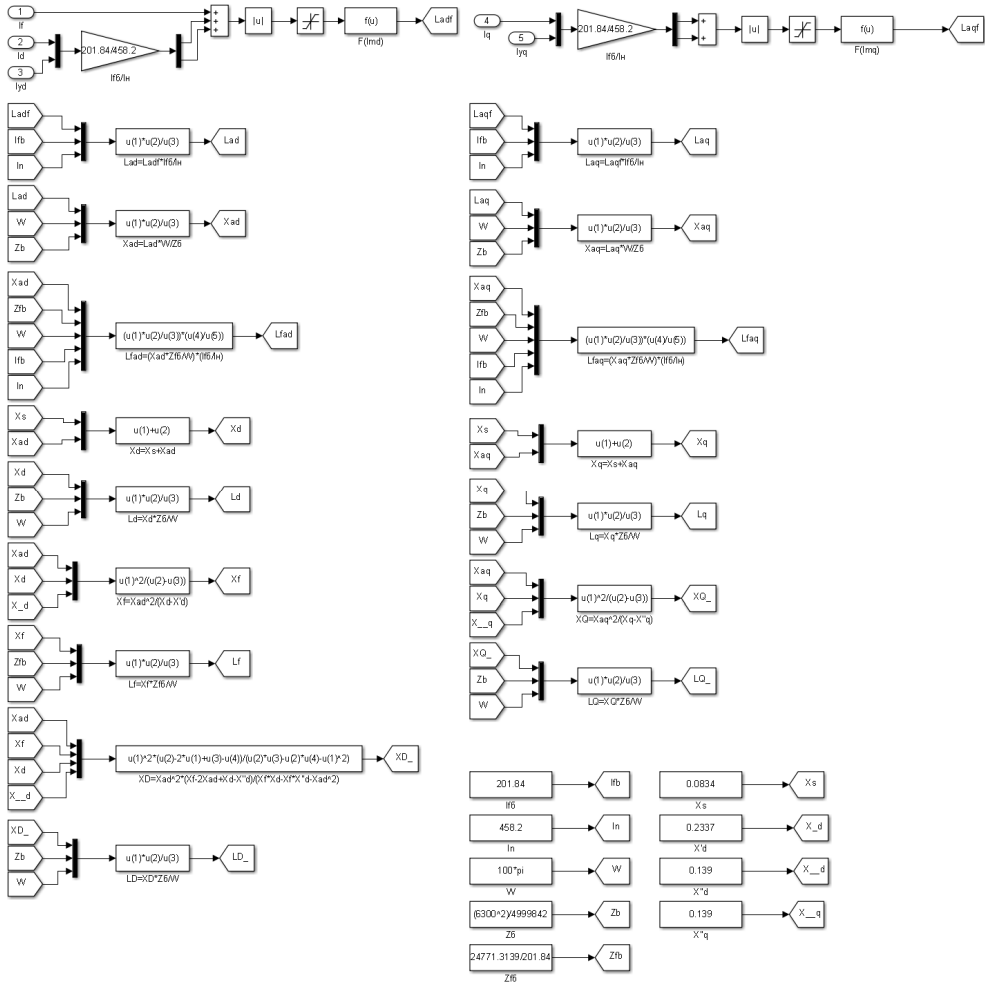


Рис. 3. Расчет параметров матрицы индуктивностей (9)

3. Результаты моделирования. Результаты моделирования представлены на рис. 5–7. Время моделирования составляет 15 с, на протяжении первых 2 с осуществлен процесс пуска генератора на холостом ходу, нагрузка на силовых шинах отсутствует. Со 2-й по 5-ю секунду моделирования подключается номинальная активная мощность 4 кВт.

На оставшихся 10 с моделирования нагрузка генератора является активно-индуктивной, помимо активной номинальной мощности включается индуктивная номинальная нагрузка мощностью 3 кВ.

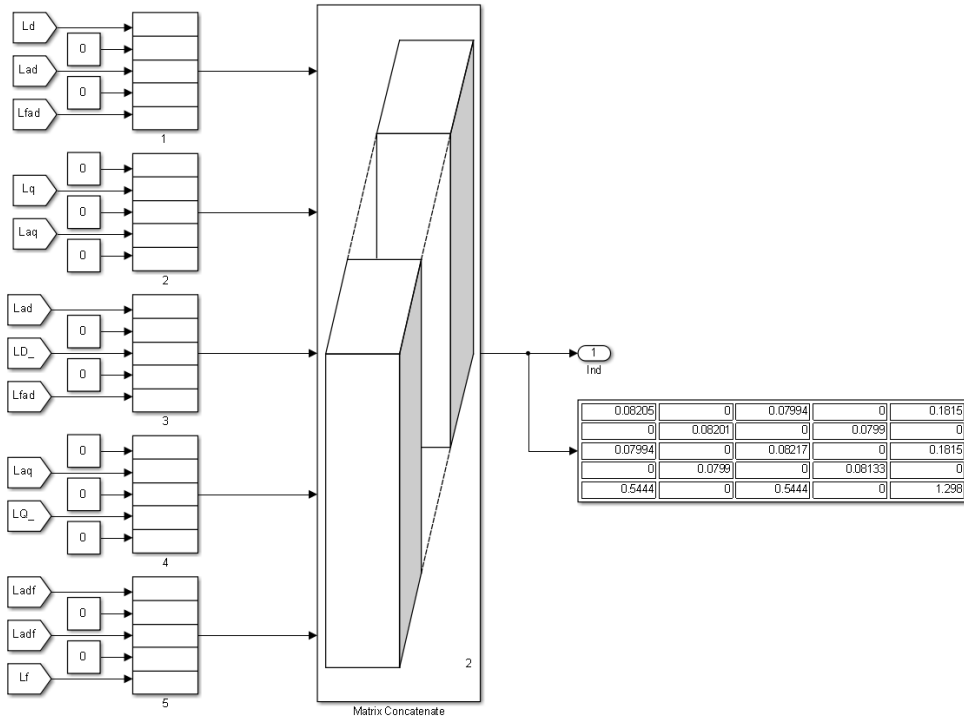


Рис. 4. Формирование итоговой матрицы индуктивностей (9)

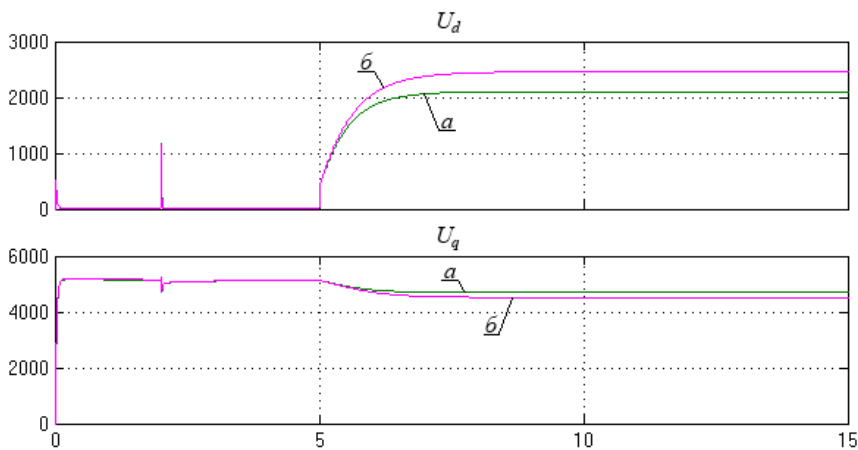


Рис. 5. Напряжение статора U_d и U_q (В): a – без учета насыщения магнитной цепи; b – с учетом насыщения магнитной цепи

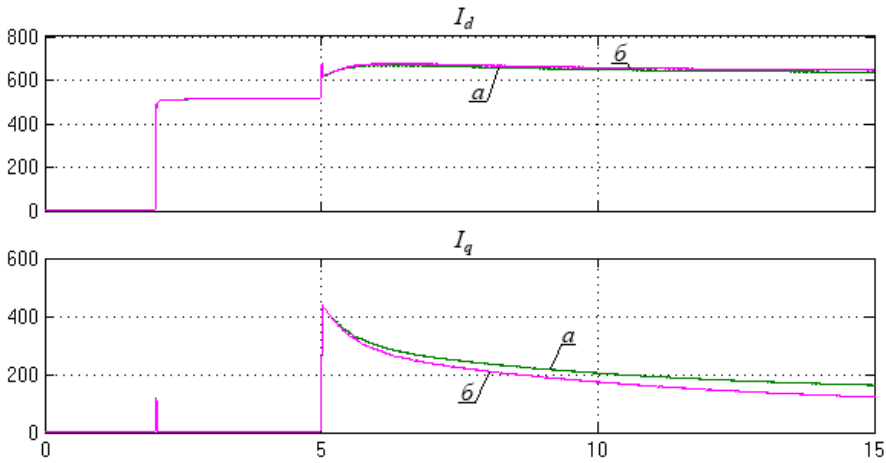


Рис. 6. Ток статора I_d и I_q (В): a – без учета насыщения магнитной цепи; b – с учетом насыщения магнитной цепи

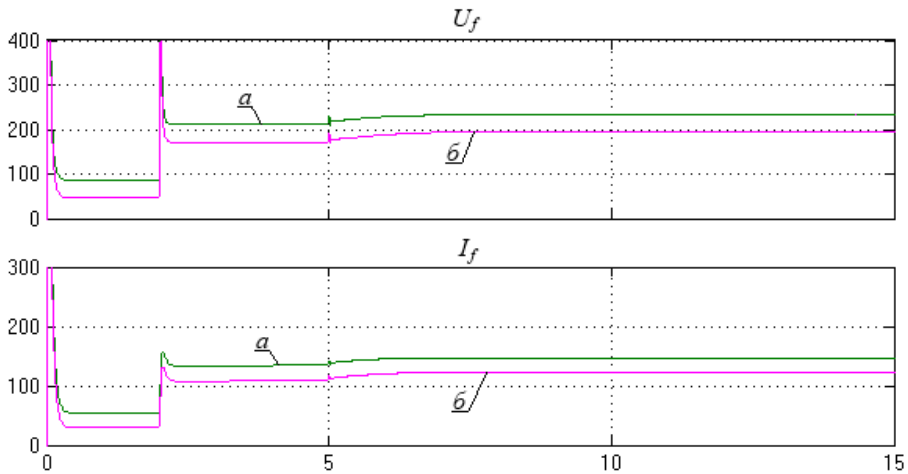


Рис. 7. Напряжение U_f (В) и ток I_f (А) обмотки возбуждения: a – без учета насыщения магнитной цепи; b – с учетом насыщения магнитной цепи

Как показывают результаты моделирования, при переходе к учету насыщения магнитной цепи путем коррекции индуктивностей взаимной индукции по продольной и поперечной осям в функции тока намагничивания на каждом шаге интегрирования статические параметры тока и напряжения статора, а также напряжения обмотки возбуждения претерпевают изменения. Данный факт указывает на необходимость учитывать насыщение магнитной цепи машины для более адекватного анализа работы САУ синхронного генератора.

Выводы. Как отмечалось выше, в связи с упрощением объекта возникает задача настройки математической модели на реальный объект с целью более адекватного описания переходных процессов. В данной статье предложена модель синхронного генератора, учитывающая насыщение магнитной цепи машины. Данная модель может быть полезна при проектировании и настройке регуляторов САУ синхронного генератора.

Библиографический список

1. Уваров С.Н. Передвижные электрические станции большой мощности. – Л.: Энергия, 1977. – 159 с.

2. Ждановский Е.О., Кавалеров Б.В., Килин Г.А. Разработка нейросетевой модели газотурбинной электростанции для настройки регуляторов газотурбинной установки [Электронный ресурс] // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12-3. – С. 479–485. – URL: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41118> (дата обращения: 18.10.2017).

3. Баринов А.В., Черновец К.Б., Орлов А.В. Малая энергетика. Проблемы и перспективы [Электронный ресурс] // XXXII Неделя науки СПбГПУ: материалы межвуз. науч.-техн. конф. Ч. II (г. Санкт-Петербург, 24–29 ноября 2003 г.). – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – С. 57–58. – URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/004159.pdf> (дата обращения: 18.10.2017).

4. Постников Н.П., Рубашов Г.М. Электроснабжение промышленных предприятий. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, 1989. – 352 с.

5. Кавалеров Б.В., Басаргин Ш.Д. Унифицированные показатели качества переходных процессов для автоматизированных испытаний газотурбинных электростанций [Электронный ресурс] // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-3. – С. 457–462. – URL: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39561> (дата обращения: 18.10.2017).

6. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока / пер. с нем. А.А. Дартау и В.А. Щедровича; под ред. А.И. Вольдека. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

7. Падалко Д.А. Электромагнитные процессы генерирования электроэнергии в мехатронной системе с асинхронной машиной: авто-

реф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.03 / Нац. исслед. Томск. политехн. ун-т. – Томск, 2017. – 20 с.

8. Крылова И.А., Тюленев М.Е. О моделировании синхронного генератора в среде Simulink для исследования автоматических регуляторов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (21–22 апреля 2016 г.). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – С. 66–71.

9. Бернас С., Цек З. Математические модели элементов электроэнергетических систем / пер. с пол. Э.В. Турского, Н.Н. Шелухина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.

10. Лютер Р.А. Расчёт синхронных машин. – Л.: Энергия, 1979. – 272 с.

References

1. Uvarov S.N. *Peredvizhnye elektricheskie stantsii bol'shoi moshchnosti* [High power mobile power stations]. Leningrad: Energiia, 1977. 159 p.

2. Zhdanovskii E.O., Kavalero V.V., Kilin G.A. *Razrabotka neirosetevoi modeli gazoturbinoi elektrostantsii dlia nastroiки regulatorov gazoturbinoi ustanovki* [Development of the of neural network model of a gas turbine power station required for setting gas turbine plant controllers]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 12-3, pp. 479-485, available at: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41118> (accessed 18 October 2017).

3. Barinov A.V., Chernovets K.B., Orlov A.V. *Malaia energetika. Problemy i perspektivy* [Small-scale power generation. Problems and prospects]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. "XXXII Nedelia nauki SPbGPU". Chast' II. Sankt-Peterburg, 24–29 November 2003 goda*. Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet, 2004, pp. 57-58, available at: <http://elib.spbstu.ru/dl/004159.pdf> (accessed 18 October 2017).

4. Postnikov N.P., Rubashov G.M. *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriatii* [Energy supply of industrial enterprises]. Leningrad: Stroiizdat, 1989. 352 p.

5. Kavalero V.V., Basargin Sh.D. *Unifitsirovannye pokazateli kachestva perekhodnykh protsessov dlia avtomatizirovannykh ispytaniy gazoturbinykh elektrostantsii* [Unified transient quality index required for

automated testing of gas turbine power plants]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 12-3, pp. 457-462, available at: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39561> (accessed 18 October 2017).

6. Kovach K.P., Rats I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients in the AC machines]. Ed. A.I. Vol'deka. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 744 p.

7. Padalko D.A. *Elektromagnitnye protsessy generirovaniia elektroenergii v mekhatronnoi sisteme s asinkhronnoi mashinai* [Electromagnetic processes of electric power generation in a mechatronic system with an asynchronous machine]. Abstract of Ph.D. tesis. Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet, 2017. 20 p.

8. Krylova I.A., Tiulenev M.E. *O modelirovanii sinkhronnogo generatora v srede Simulink dlia issledovaniia avtomaticheskikh regulatorov* [Simulation of a synchronous generator in the Simulink environment required for the investigation of automatic controllers]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-tekhniceskoi konferentsii "Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike". 21–22 April 2016 goda*. Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2016, pp. 66-71.

9. Bernas S., Tsek Z. *Matematicheskie modeli elementov elektroenergeticheskikh system* [Mathematical models of electric power systems elements]. Moscow: Energoizdat, 1982. 312 p.

10. Liuter R.A. *Raschet sinkhronnykh mashin* [Calculation of the synchronous machines]. Leningrad: Energiia, 1979. 272 p.

Сведения об авторах

Крылова Ирина Андреевна (Пермь, Россия) – инженер-проектировщик группы силового электрооборудования департамента по проектированию АО «ЭНЕРГОСЕРВИС», аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614016, г. Пермь, ул. Краснофлотская, 33, e-mail: krylova@eservice.perm.ru).

Кавалеров Борис Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

Чабанов Евгений Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29); доцент кафедры «Технические дисциплины» Пермского филиала Волжского государственного университета водного транспорта (614060, г. Пермь, Б. Гагарина, 33, e-mail: ceapb@mail.ru).

About the authors

Krylova Irina Andreevna (Perm, Russian Federation) is a design engineer of the power equipment group of the design department of АО «ENERGOSERVIS» (614016, Perm, 33, Krasnoflotskaia st., e-mail: krylova@eservice.perm.ru).

Boris Vladimirovich Kavalerov (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Science, Professor head of the Electrotechnics and electromechanics department of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

Chabanov Evgenii Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Electrotechnics and electromechanics department of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr.); Associate Professor of the Department of Technical Sciences of Perm Branch of FSBEI HO «Volga state university of water transport» (614060, Perm, 33, Bulvar Gagarina, e-mail: ceapb@pstu.ru).

Получено 09.10.2017