

Разработка электромагнитного тормоза для стабилизации частоты вращения аварийной авиационной ветроэлектрической установки

ШИРОКОВ А.А., ДЕЖИН Д.С., ЗДОРОВА М.В.

Рассмотрен принцип действия электромагнитного тормоза и его применение для стабилизации частоты вращения аварийной авиационной ветроэлектрической установки. Предложен пример конструкции электромагнитного тормоза для авиационной ветроэлектрической установки. Сделан конечно-элементный анализ магнитного поля электромагнитного тормоза, проведено исследование различных материалов для его ротора. Получены основные зависимости тормозного момента от тока возбуждения и частоты вращения аварийных авиационных ветроэлектрических установок, которые будут использованы для динамического моделирования в MATLAB Simulink.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электромагнитный тормоз, электромеханический преобразователь, аварийная авиационная ветроэлектрическая установка, конечно-элементный анализ магнитных полей, вихревые токи

Повышение надежности системы электроснабжения самолёта — одна из основных задач развития авиационной техники, в том числе для перспективных более электрических и полностью электрических самолетов [1]. На борту воздушного судна широко используется резервирование электроэнергии, а также применяются дополнительные аварийные системы генерирования, к которым относятся аккумуляторные батареи и аварийные авиационные ветроэлектрические установки.

Аварийные системы обеспечивают электроэнергией устройства и системы, необходимые для посадки самолёта в случае отказа других систем генерирования [3]. Одна из применяемых в настоящее время аварийных ветроэлектрических установок (АВЭУ) представлена на рис. 1.

Аварийные авиационные турбины используются на многих самолетах, но при этом имеют различное назначение (см. рис. 2) [4]:

по виду преобразования энергии:
электромеханические;



Рис. 1. Аварийная авиационная ветроэлектрическая установка самолета Embraer 190–100

гидромеханические;

электро-гидромеханические;

по назначению:

для резервирования системы электроснабжения;
для резервирования гидравлической системы.

Аварийная ветроэлектрическая установка состоит из бесщеточного синхронного генератора переменного тока, воздушной турбины, приводимой во вращение встречным потоком воздуха, и центробежного регулятора, пример которого приведен на рис. 3 [4]. Центробежный регулятор осуществляет стабилизацию частоты вращения за счёт изменения угла поворота лопастей. По причине низкого быстродействия регулятор не способен полностью стабилизировать частоту вращения ротора, он лишь ограничивает диапазон её изменения. Поэтому накладываются жесткие требования на пилотирование самолёта с выпущенной генераторной ветроустановкой.

В качестве нового технического решения для более глубокой и быстрой стабилизации частоты вращения вала АВЭУ авторы исследовали возможность применения электромагнитного тормоза. Подобное его использование для других систем рассматривалось в [5–9]

Общее описание. Принцип действия электромагнитного тормоза (ЭМТ) основан на законе электромагнитной индукции Фарадея. В нем описывается процесс появления вихревых токов во вращающемся металлическом диске при наличии переменного и постоянного магнитного поля [10, 11]. Предлагаемая конструкция ЭМТ (рис. 4) состоит из подвижного металлического корпуса ветроустановки, неподвижного магнитопровода и катушек электромагнита [12, 13]. При подаче посто-



Рис. 2. Классификация аварийных авиационных турбин

янного тока в катушки создаётся электромагнитное поле возбуждения, которое пронизывает корпус ветроустановки. При вращении магнитное поле, создаваемое катушками, становится квазипеременным для вращающегося корпуса, что приводит к возникновению в нем вихревых токов. Взаимодействие магнитных полей приводит к возникновению тормозного момента. Протекание вихревых токов сопровождается выделением тепла во вращающемся

корпусе ветроустановки [14]. Механически ЭМТ соединен с ротором генератора и ветроустановкой, поэтому возникающий электромагнитный момент оказывает противодействие аэродинамическому моменту крыльчатки ротора АВЭУ.

Для поддержания стабильной частоты вращения ротора АВЭУ можно использовать следующий алгоритм управления: на выходе генератора измеряется уровень и частота напряжения, при отклонении значения напряжения от заданного постоянно значения за счет увеличившегося числа оборотов вала генератора возрастает ток в обмотках тормозного устройства АВЭУ. При этом повышается тормозной момент, который снижает частоту вращения вала до нужного значения. В случае падения напряжения на выходе генератора ток в катушках тормозного устройства уменьшается и частота вращения вала генератора увеличивается. Данный ал-

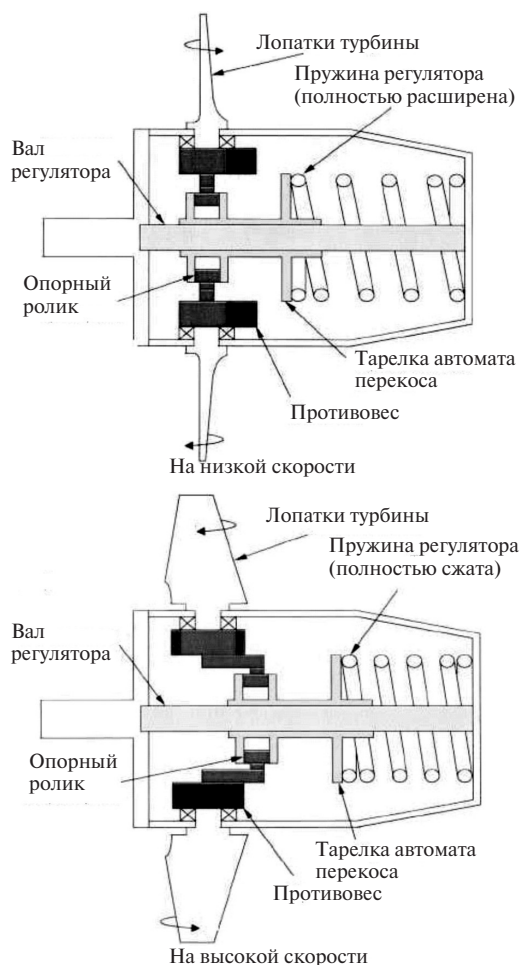


Рис. 3. Схема стабилизатора частоты вращения

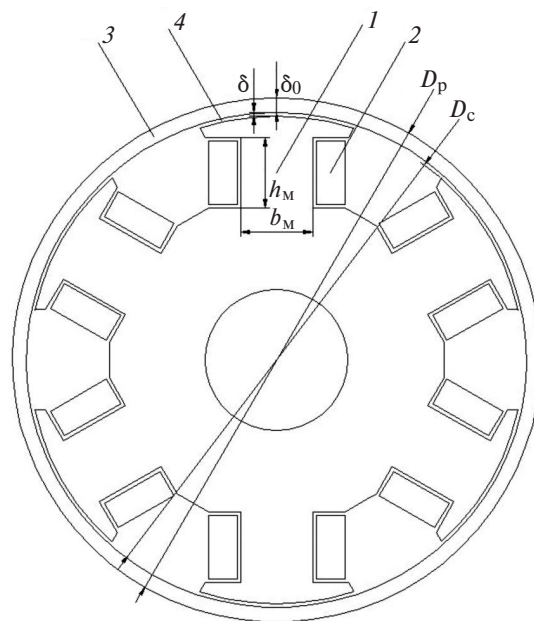


Рис. 4. Расчетная модель электромагнитного тормоза: 1 – стальной магнитопровод индуктора; 2 – обмотка возбуждения; 3 – корпус ветроустановки; 4 – воздушный зазор

горитм работы АВЭУ позволяет освободить пилота от постоянного слежения за скоростью полета в аварийном режиме.

При включении ЭМТ создает дополнительный тормозной момент, что препятствует увеличению частоты вращения вала генератора. Главным достоинством применения такого типа тормоза являются быстрдействие, эффективность, низкая энергозатратность и гибкость регулирования.

Электромагнитный тормоз действует на баланс моментов на валу генератора, поэтому тормозной момент входит непосредственно в уравнение движения ротора генератора [16, 17]:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_{\text{пр}} - M_{\text{э}} - M_{\text{т}},$$

где J – момент инерции вращающихся частей АВЭУ; Ω – угловая скорость вращения ротора; $M_{\text{пр}}$ – крутящий момент привода; $M_{\text{э}}$ – электромагнитный момент генератора; $M_{\text{т}}$ – тормозной момент, создаваемый ЭМТ [18]:

$$M_{\text{т}} = \int_{\text{disk}} r(j+B)dV,$$

где j – плотность тока в роторе ЭМТ; B – индукция магнитного поля.

Результаты расчёта магнитных полей и характеристик ЭМТ. При решении задачи, связанной с движением и/или изменением энергии, возникает необходимость решения дифференциальных уравнений в частных производных. В большинстве случаев для этого применяют численные методы, которые реализованы в различных программных продуктах. Одним из таких пакетов является пакет COMSOL Multiphysics, представляющий собой среду моделирования физических процессов, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных (уравнениями математической физики). В этой программе дифференциальные уравнения в двух- и трехмерной постановке решаются методом конечных элементов.

Исходя из удобства и универсальности решаемых задач, распределение магнитных полей в ЭМТ рассчитывалось методом конечных элементов (МКЭ) в программном продукте COMSOL Multiphysics.

Характеристики ЭМТ определялись при следующих значениях параметров: $D_c=138$ мм – наружный диаметр статора; $D_p=148$ мм – наружный диаметр ротора; $\delta_0=4$ мм – номинальная толщина внешней вращающейся оболочки (корпуса); $l_\delta=50$ мм – активная осевая длина; $\delta=1$ – эквивалентный воздушный зазор; $w=144$ – число витков

обмотки возбуждения; $a_{\text{пр}}=1$ мм² – площадь поперечного сечения элементарного проводника обмотки возбуждения; $b_M=20$ мм – ширина полюса магнитопровода статора; $h_M=20$ мм – высота полюса магнитопровода статора; $I_B=10$ А – номинальное значение тока обмотки возбуждения; $n=8000$ мин⁻¹ – номинальная частота вращения.

Значение тормозного момента зависит от индукции магнитного поля и плотности тока во вращающейся части ЭМТ, поэтому было проведено моделирование для оценки значений этих параметров и определения тормозного момента.

Первоначально модель ЭМТ была построена с вращающимся массивным стальным ротором [14]. Результаты конечно-элементного анализа магнитного поля и распределение плотности тока представлены на рис. 5. Итоги расчёта позволили сделать два вывода: 1) магнитная индукция статора не превышает допустимую для выбранной марки стали; 2) в роторе возникают значительные вихревые токи, необходимые для создания тормозного момента при номинальной частоте вращения.

Основные характеристики ЭМТ: регулировочная – зависимость тормозного момента от тока обмотки возбуждения при постоянстве частоты вращения и рабочая – зависимость тормозного момента от частоты вращения при постоянстве тока в

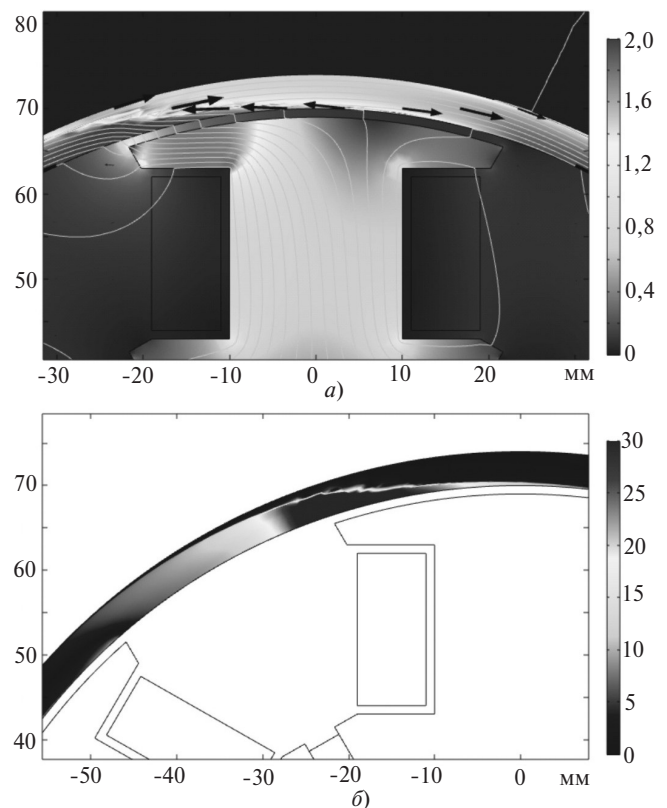


Рис. 5. Картины распределения магнитного поля (а) и плотности тока (б) в ЭМТ

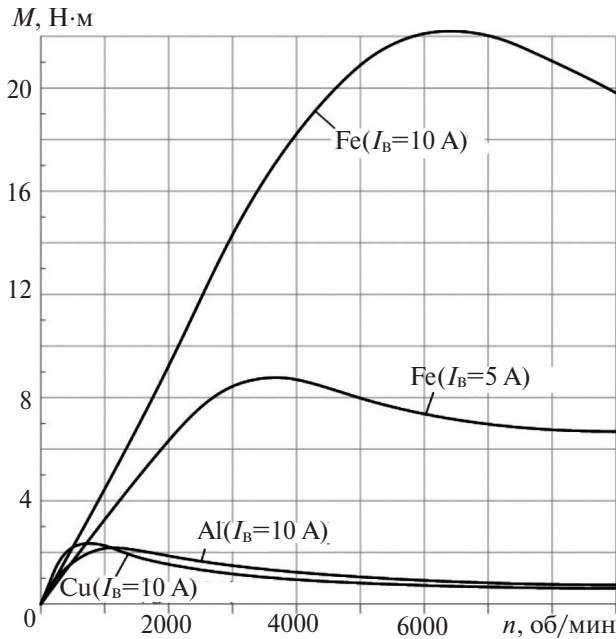


Рис. 6. Зависимость тормозного момента от частоты вращения

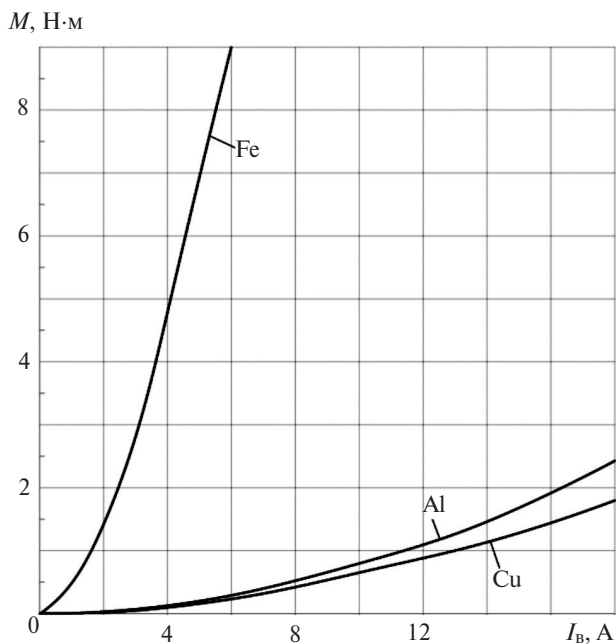


Рис. 7. Зависимость тормозного момента от тока возбуждения

обмотке возбуждения [20]. Эти зависимости, полученные в результате расчёта для разных материалов ротора, представлены на рис. 6 и 7.

Для определения наибольшего значения тормозного момента проведено исследование различных материалов ротора ЭМТ. Как видно из рис. 6 и 7, алюминий и медь имеют значительно меньшие значения тормозного момента и пик его смещен в область скоростей, меньших номинальной. Это связано с более низким значением магнитной проницаемости этих материалов по сравнению с электротехнической сталью, что требует увеличения МДС, необходимой для создания вихревых токов в роторе.

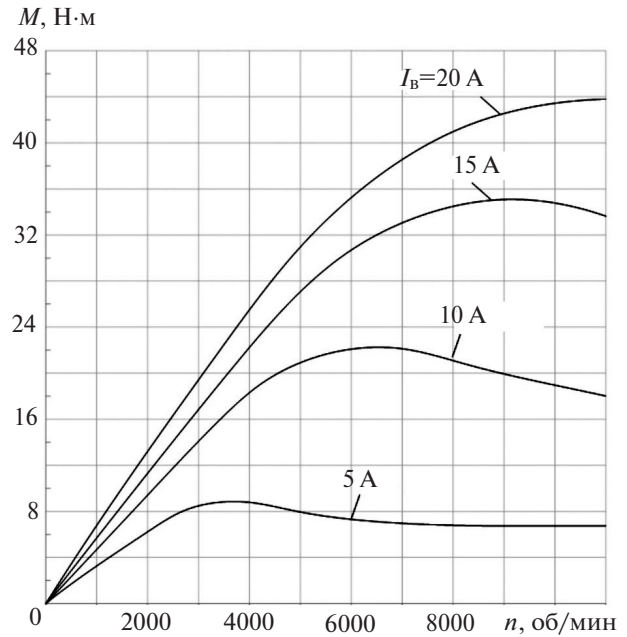


Рис. 8. Зависимость тормозного момента от частоты вращения

Следовательно, несмотря на большую массу стального ротора, энергоэффективность создания тормозного момента с помощью данного материала самая высокая. На основании этого критерия для дальнейшего анализа была выбрана электротехническая сталь для вращающейся части ЭМТ.

Согласно рис. 6 в части кривой (после максимума тормозного момента) наблюдается следующий эффект: при увеличении скорости полёта и, соответственно, частоты вращения значение тормозного момента уменьшается, что приводит к образованию положительной обратной связи. Это, в свою очередь, еще больше увеличивает частоту вращения ЭМТ и снижает значение тормозного момента, что недопустимо. Следовательно, для обеспечения за-

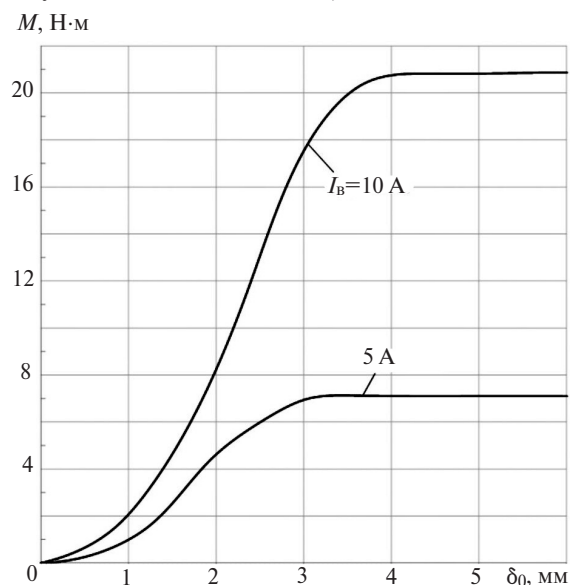


Рис. 9. Зависимость тормозного момента от толщины стальной оболочки

паса по регулированию необходимо увеличить ток обмотки возбуждения. Зависимости тормозного момента от частоты вращения при различных значениях тока возбуждения приведены на рис. 8.

Исходя из представленных характеристик можно сделать вывод: наибольший запас по регулированию (при частоте до 10000 об/мин) обеспечивается при токе возбуждения 20 А.

Толщина стальной оболочки является важным конструктивным параметром, который напрямую влияет на значение тормозного момента и массу ЭМТ. На рис. 9 представлена зависимость тормозного момента от толщины стальной оболочки ротора.

Как видно из рисунка, оптимальной толщиной стальной оболочки является 4 мм. Низкое значение тормозного момента при толщине, меньшей 3 мм, связано с повышением индукции в роторе ЭМТ свыше 2 Тл и насыщением стали. Однако большую толщину использовать нецелесообразно из-за увеличения массы и сокращения токового слоя при высоких значениях частоты вращения ротора ЭМТ.

Результаты численного расчета температуры ротора для различных материалов. Во время работы электромагнитного тормоза в роторе возникают большие вихревые токи, что приводит к большому тепловыделению. Тепло от ротора отводится набегающим потоком воздуха при температуре - 50°С, охватывающим всю внешнюю поверхность корпуса ветроустановки.

Расчёт температурного поля проводился для ротора, выполненного из алюминия и меди, при значениях тока обмотки возбуждения от 5 до 20 А. Используемые материалы имеют свои критические

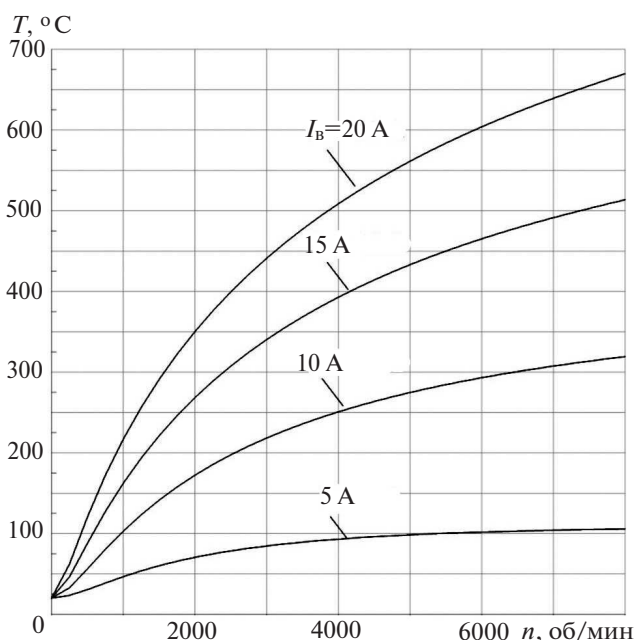


Рис. 10. Зависимость температуры в медном роторе от частоты вращения

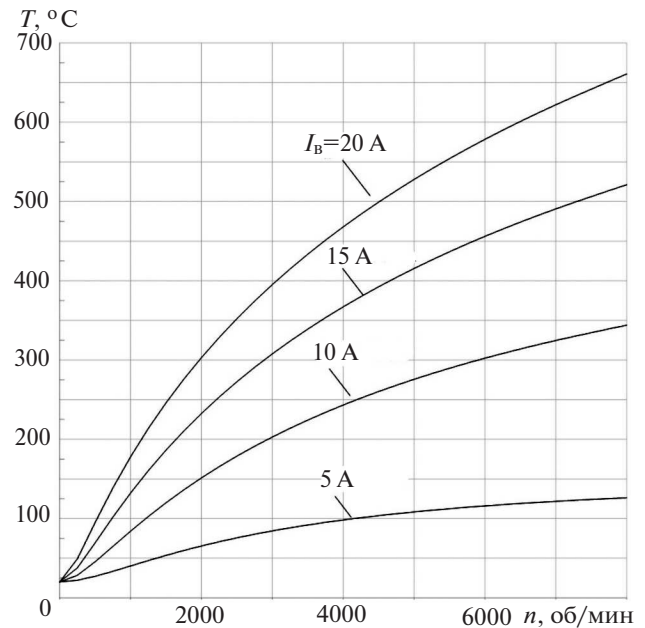


Рис. 11. Зависимость температуры в алюминиевом роторе от частоты вращения

значения температуры, при достижении которых свойства материалов меняются. Так, использование меди как материала для ротора возможно только до температуры 1000°С, а алюминия – до 600°С.

На рис. 10 и 11 показаны зависимости температуры от частоты вращения для медного и алюминиевого роторов. Видно, что использование медного или алюминиевого ротора при токах выше 15 А нецелесообразно из-за высоких значений температуры в установившемся режиме работы тормоза. Для ротора из электротехнической стали подобные характеристики будут получены при дальнейших исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лёвин А.В., Мусин С.М., Харитонов С.А., Ковалев К.Л., Герасин А.А., Халютин С.П. Электрический самолёт: концепция и технологии. Уфа: УГАТУ, 2014, 388 с.
2. Magedi Moh. M. Saad, Sofian Bin Mohd, Mohd Fadhli Zulkaffi. A Survey on the Use of Ram Air Turbine in Aircraft. – 7th Intern. Conf. on Mechanical and Manufacturing Engineering AIP Conf. Proc, 2017, vol. 1831, DOI 10.1063/1.4981189.
3. Электрооборудование летательных аппаратов: Учебник для вузов/Под ред. С.А. Грузкова 2, т. 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. М.: Изд-во МЭИ, 2005, 568 с.
4. Кашин Я.М., Кашин А.Я., Князев А.С. Современное состояние аварийных авиационных турбин и их классификация. – Вестник Адыгейского государственного университета, серия 4. Естественно-математические науки, 2017, вып. 1(196), с. 111–121.
5. Gay S.E. Contactless magnetic brake for automotive applications, Ph.D. dissertation, Inst. Nat. Polytech. de Grenoble, Texas A&M Univ., College Station, TX, USA, 2005.
6. Canova A., Vusini B. Design of axial eddy-current couplers. – IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, No. 3, pp. 725–733, May/Jun. 2003.

7. Sharif S., Faiz J., Sharif K. Performance analysis of a cylindrical eddy current brake» — IET Electr. Power Appl., 2012, vol. 6, iss. 9, pp. 661–668, doi: 10.1049/iet-epa.2012.0006.
8. Wang J., Lin H., Fang S., Huang A. General Analytical Model of Permanent Magnet Eddy Current Couplings. — IEEE Transactions on magnetics, 2014, vol. 50, No. 1.
9. Altoma A.S., Alhakeem M.R. Design and Simulation of Electrical Emergency System in Aircraft using Ram Air Turbine. — IEEE Intern. Conf. on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & Intern. Transportation Electrification Conf., 2018.
10. Панин А.В., Чумаченко В.В., Кузнецов О.Н. Моделирование электромагнитного тормоза для улучшения условий динамической устойчивости. — Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2014, № 9–10.
11. Reza Yazdanpanah, Mojtaba Mirsalim, Axial-Flux Wound-Excitation Eddy-Current Brakes: Analytical Study and Parametric Modeling. — IEEE Transactions on magnetics, June 2014, vol. 50, No. 6.
12. Liu C.Y., Jiang K.J., Zhang Y. Design and use of an eddy current retarder in an automobile. — International Journal of Automotive Technology, vol. 12, No. 4, pp. 611–616 (2011), DOI 10.1007/s12239-011-0071-3.
13. Bruno Lequesne, Buyun Liu, Thomas W. Nehl. Eddy-Current Machines with Permanent Magnets and Solid Rotors. — IEEE Transactions on industry applications, September/October 1997, vol. 33, No. 5, pp. 1289–1294.
14. Anwar S. A parametric model of an eddy current electric machine for automotive braking applications. — IEEE Trans. Control Syst. Technol., May 2004, vol. 12, No. 3, pp. 422–427.
15. Choi J.S., Yoo J. Design of an eddy current brake system using microstructures. — IEEE Trans. Magn., 2009, vol. 45, No. 6, pp. 2720–2723.
16. Shin H.J., Choi J.Y., Cho H.W., Jang S.M. Analytical torque calculations and experimental testing of permanent magnet axial eddy current brake. — IEEE Trans. Magn., Jul. 2013, vol. 49, No. 7, pp. 4152–4155.
17. Бертинов А.И., Бут Д.А., Мизюрин С.Р., Алиевский Б.Л., Синева Н.В. Специальные электрические машины/Под ред. Б.Л. Алиевского. М.: Энергоатомиздат, 1993.
18. Бут Д.А. Основы электромеханики. М.: Изд-во МАИ, 1996, 468 с.
19. Бутырин П.А., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В. Численное моделирование электромагнитных полей: мультифизические задачи, инструментарий и обучение. — Электричество, 2019, № 6, с. 51–58.
20. Антипова Н.А., Кузнецов О.Н. Определение технических характеристик электромагнитного тормоза для улучшения динамической устойчивости ЭЭС. — Вестник МЭИ, 2012, № 1, с. 54–59.

[27.02.2020]

А в т о р ы: Широков Антон Александрович — студент магистратуры НИУ «Московский авиационный институт» (НИУ «МАИ»).

Дежин Дмитрий Сергеевич — кандидат техн. наук, доцент НИУ «МАИ», диссертацию защитил в 2008 г.

Здорова Марина Витальевна — студентка магистратуры НИУ «МАИ».

[27.03.2020]

Electrichestvo, 2020, No. 8, pp. 37–43

DOI:10.24160/0013-5380-2020-8-37-43

Development of an Electromagnetic Brake for Stabilizing the Ram Air Turbine Rotation Frequency

SHIROKOV Anton A. (NRU «Moscow Aviation Institute» — NRU «MAI», Moscow, Russia) — Master student

DEZHIN Dmitriy S. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

ZDOROVA Marina V. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Master student

The operation principle of an electromagnetic brake and its application for stabilizing the ram air turbine (RAM) rotation frequency are considered. An example of the electromagnetic brake design for the RAT is proposed. The electromagnetic brake magnetic field is analyzed using the finite element method, and the use of different materials for making the brake rotor is investigated. The main dependences of the braking torque on the excitation current and RAT rotation frequency are obtained, which will be used for dynamic modeling in the MATLAB Simulink software environment.

Key words: *electromagnetic brake, electromechanical converter, ram air turbine, finite element analysis of magnetic fields, eddy currents*

REFERENCES

1. Lovin A.V., Musin S.M., Kharitonov S.A., Kovalev K.L., Gerasin A.A., Khalyutin S.P. *Elektricheskiy samolot: kontseptsiya i tekhnologii* (Electric aircraft: concept and technology), Ufa: UGATU, 2014, 388 p.
2. Magedi Moh. M. Saad, Sofian Bin Mohd, Mohd Fadhi Zulkafli. A Survey on the Use of Ram Air Turbine in Aircraft. — 7th Intern. Conf. on Mechanical and Manufacturing Engineering AIP Conf. Proc, 2017, vol. 1831, DOI 10.1063/1.4981189.
3. *Elektrooborudovaniye letatel'nykh apparatov: Uchebnik dlya vuzov/Pod red. S.A. Gruzkova, t. 1. Sistemy elektrobnabzheniya letatel'nykh apparatov* (Electrical equipment of aircraft: Textbook for universities/Ed. S.A. Gruzkov, v. 1. Aircraft power supply systems). M.: Izd-vo MEI, 2005, 568 p.
4. Kashin Ya.M., Kashin A.Ya., Knyazev A.S. *Sovremennoye sostoyaniye avariynykh aviatsionnykh turbin i ikh klassifikatsiya. — Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta, seriya 4. Yestestvenno-matematicheskoye nauki* (The current state of emergency aircraft turbines and their classification. — Bulletin of the Adyge

State University, series 4. Natural and mathematical sciences), 2017, iss. 1 (196), pp. 111–121.

5. **Gay S.E.** Contactless magnetic brake for automotive applications, Ph.D. dissertation, Inst. Nat. Polytech. de Grenoble, Texas A&M Univ., College Station, TX, USA, 2005.

6. **Canova A., Vusini B.** Design of axial eddy-current couplers. — IEEE Trans. Ind. Appl., May/June. 2003, vol. 39, No. 3, pp. 725–733.

7. **Sharif S., Faiz J., Sharif K.** Performance analysis of a cylindrical eddy current brake. — IET Electr. Power Appl., 2012, vol. 6, iss. 9, pp. 661–668, doi: 10.1049/iet-epa.2012.0006.

8. **Wang J., Lin H., Fang S., Huang Y.** A General Analytical Model of Permanent Magnet Eddy Current Couplings. — IEEE Transactions on magnetics, 2014, vol. 50, No. 1.

9. **Altoma A.S., Alhakeem M.R.** Design and Simulation of Electrical Emergency System in Aircraft using Ram Air Turbine. — IEEE Intern. Conf. on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & Intern. Transportation Electrification Conf., 2018.

10. **Panin A.V., Chumachenko V.V., Kuznetsov O.N.** *Izv. vuzov. Problemy energetiki – in Russ. (News of higher educational institutions. Energy problems)*, 2014, No. 9–10.

11. **Reza Yazdanpanah, Mojtaba Mirsalim,** Axial-Flux Wound-Excitation Eddy-Current Brakes: Analytical Study and Parametric Modeling. — IEEE Transactions on magnetics, June 2014, vol. 50, No. 6,.

12. **Liu C.Y., Jiang K.J., Zhang Y.** Design and use of an eddy current retarder in an automobile. — International Journal of

Automotive Technology, vol. 12, No. 4, pp. 611–616 (2011), DOI 10.1007/s12239-011-0071-3.

13. **Bruno Lequesne, Buyun Liu, Thomas W. Nehl.** Eddy-Current Machines with Permanent Magnets and Solid Rotors. — IEEE Transactions on industry applications, September/October 1997, vol. 33, No. 5, pp. 1289–1294.

14. **Anwar S.** A parametric model of an eddy current electric machine for automotive braking applications. — IEEE Trans. Control Syst. Technol., May 2004, vol. 12, No. 3, pp. 422–427.

15. **Choi J.S., Yoo J.** Design of an eddy current brake system using microstructures. — IEEE Trans. Magn., 2009, vol. 45, No. 6, pp. 2720–2723.

16. **Shin H.J., Choi J.Y., Cho H.W., Jang S.M.** Analytical torque calculations and experimental testing of permanent magnet axial eddy current brake. — IEEE Trans. Magn., Jul. 2013, vol. 49, No. 7, pp. 4152–4155.

17. **Bertinov A.I., But D.A., Mizyurin S.R., Aliyevskiy B.L., Sineva N.V.** *Spetsial'nyye elektricheskiye mashiny/Pod red. B.L. Aliyevskogo* (Special electrical machines/Ed. B.L. Alievsky). M.: Energoatomizdat, 1993.

18. **But D.A.** *Osnovy elektromekhaniki* (Fundamentals of Electromechanics). M.: Izd-vo MAI, 199, 468 p.

19. **Butyrin P.A., Dubitskiy S.D., Korovkin N.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 6, pp. 51–58.

20. **Antipova N.A., Kuznetsov O.N.** *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of MEI)*, 2012, No. 1, pp. 54–59.

[27.02.2020]