

Математическая модель бортовой сети беспилотного измерителя коэффициента сцепления

А. Р. Музалевский¹, Е. В. Друян, М. А. Чернышев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹muzal2010@yandex.ru

Аннотация. В докладе моделируется движение беспилотного измерителя коэффициента сцепления с электромеханическим торможением измерительного колеса и рекуперацией энергии торможения в бортовую электрическую сеть. Модель содержит тяговый двигатель, тормозной генератор и аккумуляторную батарею. В результате анализа системы выявлено значительное влияние величины нагрузки на процесс рекуперации.

Ключевые слова: математическая модель; коэффициент сцепления; бортовая сеть; рекуперация энергии

I. ВВЕДЕНИЕ

В работе описывается математическая модель системы двигатель-генератор с аккумуляторной батареей. Обе электрические машины являются бесколлекторными двигателями постоянного тока (BLDC).

Целью данной работы является получение базовой системы управления скольжением измерительного колеса беспилотного измерителя коэффициента сцепления с электродвижением.

II. ОБЗОР РАБОТ СХОЖЕЙ ТЕМАТИКИ

Описание системы электродвижения с использованием BLDC двигателя можно найти в

работах [1–6]. Обычная структурная схема содержит аккумуляторную батарею, задачник скорости, драйвер – управляемый инвертор и двигатель. Рекуперация энергии торможения в бортовую сеть описывается в работах [7–9]. Беспилотный измеритель коэффициента сцепления в процессе измерения должен одновременно двигаться и подтормаживать измерительное колесо, что сближает его с системами генерации энергии, описанные в работах [10–13].

III. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЯ

Структурная схема на рис. 1 иллюстрирует устройство беспилотного измерителя коэффициента сцепления. Для движения в нём используется тяговый двигатель **М**, присоединённый к ведущему колесу **ВК**. Во время движения по взлётно-посадочной полосе вращается измерительное колесо (**ИК**), присоединённое к тормозному генератору (**ТГ**). Сигнал $\omega_{ТГ}$ поступает в систему управления скольжением с датчика скорости тормозного генератора (**ДС_{ТГ}**). Тормозной генератор подключён к трёхфазному управляемому выпрямителю, на выходе которого возникает постоянное напряжение, амплитуда которого зависит от частоты вращения измерительного колеса.

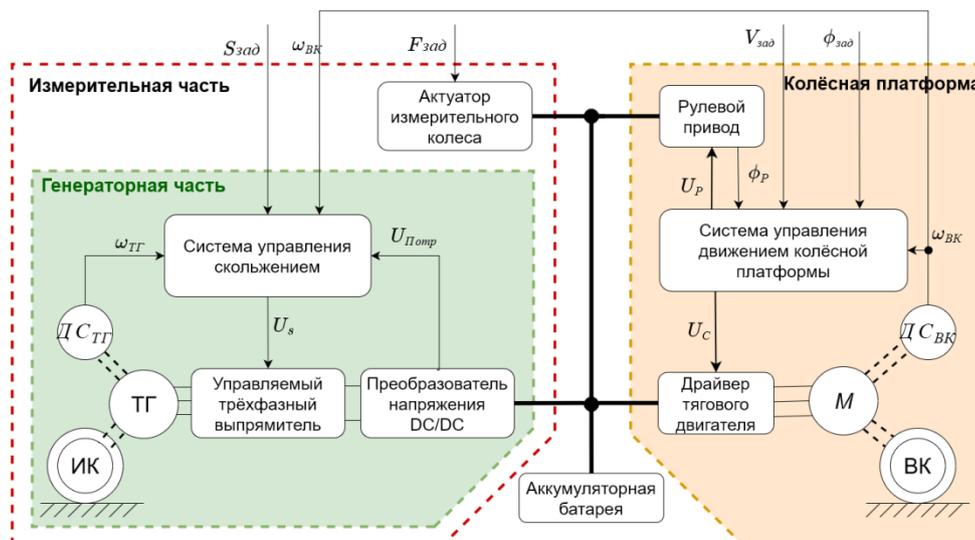


Рис. 1. Структурная схема беспилотного измерителя коэффициента сцепления

По сигналу U_S в цепи тормозного генератора появляется электрическая нагрузка, что создаёт тормозной момент на измерительном колесе. В систему управления скольжением от преобразователя напряжения поступает сигнал $U_{\text{потр}}$, пропорциональный току рекуперации, а от колёсной платформы – частота вращения ведущих колёс $\omega_{\text{ВК}}$, необходимая для вычисления значения скольжения.

Скольжение $S_{\text{ИК}}$ вычисляется по формуле $S_{\text{ИК}} = (\omega_{\text{ВК}} - \omega_{\text{ИК}})\omega_{\text{ВК}}^{-1}$, угловые скорости ведущих колёс $\omega_{\text{ВК}}$ и измерительного колеса $\omega_{\text{ИК}}$ измеряются датчиками ДС_{ВК} и ДС_{ТГ} соответственно, причём угловая скорость $\omega_{\text{ИК}} = \omega_{\text{ТГ}}/i_{\text{ИК/ТГ}}$.

Для учёта упругих свойств шины ИК введены угловая скорость ступицы колеса $\omega_{\text{ст}}$ с моментом инерции $J_{\text{ст}}$ и угловая скорость шины измерительного колеса $\omega_{\text{ш}}$ с моментом инерции $J_{\text{ш}}$, а также коэффициент упругости шины измерительного колеса $p_{\text{ш}}$ и моментом упругости шины $m_{\text{у.ш}}$. Для учёта люфта в трансмиссии измерительного колеса введён зазор 2δ .

Модель бесколлекторной трёхфазной электрической машины приведена с учётом следующих допущений: обмотки статора считаются симметричными и соединёнными в звезду, форма противо-ЭДС – идеальная трапеция, а выпрямленное напряжение $V_{\text{dc}} = 2k_e\omega_{\text{ТГ}}$ [14].

Математическая модель бортовой сети, как объекта управления в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений относительно введенных переменных состояния $\omega_{\text{ш}}$, $m_{\text{у.ш}}$, $\omega_{\text{ст}}$, $\theta_{\text{ст}}$, $\theta_{\text{ТГ}}$, $\omega_{\text{ТГ}}$, i_A , i_B , i_C , i_{A_M} , i_{B_M} , i_{C_M} , ω_M , v имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{\text{ш}} &= J_{\text{ш}}^{-1}(M_{\text{тр.ш}}(\cdot) - m_{\text{у.ш}}); \\ M_{\text{тр.ш}}(\cdot) &= F_{\text{тр}}(\cdot)R_{\text{ш}}; \\ \dot{m}_{\text{у.ш}} &= p_{\text{ш}}(\omega_{\text{ш}} - \omega_{\text{ст}}); \\ \dot{\omega}_{\text{ст}} &= J_{\text{ст}}^{-1}(m_{\text{у.ш}} - m_{\text{транс}}); \\ m_{\text{транс}} &= \begin{cases} i_{\text{ИК/ТГ}}^{-1}M_{\text{ТГ}}, & \text{если } |\theta_{\text{ст}} - \theta_{\text{ТГ}}| \geq \delta; \\ 0, & \text{если } |\theta_{\text{ст}} - \theta_{\text{ТГ}}| < \delta; \end{cases} \\ \dot{\theta}_{\text{ст}} &= \omega_{\text{ст}}; \\ \dot{\theta}_{\text{ТГ}} &= \omega_{\text{ТГ}}; \\ \dot{\omega}_{\text{ТГ}} &= J_{\text{ТГ}}^{-1}(M_{\text{ТГ}} - M_{\text{НГ}}); \\ M_{\text{ТГ}} &= \omega_{\text{ТГ}}^{-1}(e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C); \\ \begin{cases} \dot{i}_A = -\frac{R}{L-M}i_A + \frac{1}{L-M}(U_A - e_A) \\ \dot{i}_B = -\frac{R}{L-M}i_B + \frac{1}{L-M}(U_B - e_B); \\ \dot{i}_C = -\frac{R}{L-M}i_C + \frac{1}{L-M}(U_C - e_C) \end{cases} \\ \begin{cases} e_A = k_e\omega_{\text{ТГ}}f_{\text{EMF}}(p\theta_{\text{ТГ}}) \\ e_B = k_e\omega_{\text{ТГ}}f_{\text{EMF}}\left(p\theta_{\text{ТГ}} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_C = k_e\omega_{\text{ТГ}}f_{\text{EMF}}\left(p\theta_{\text{ТГ}} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \\ V_{\text{dc}} &= 2k_e\omega_{\text{ТГ}}; \\ I_{\text{ТГ}} &= u_S(t) * \frac{V_{\text{dc}}}{R_s(\cdot)}; \end{aligned}$$

$$\begin{cases} I_M = I_{\text{АКБ}} + I_{\text{ТГ}}; \\ e_{A_M} = k_e\omega_M f_{\text{EMF}}(p\theta_M) \\ e_{B_M} = k_e\omega_M f_{\text{EMF}}\left(p\theta_M - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_{C_M} = k_e\omega_M f_{\text{EMF}}\left(p\theta_M + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{i}_{A_M} = -\frac{R}{L-M}i_{A_M} + \frac{1}{L-M}(U_{A_M} - e_{A_M}) \\ \dot{i}_{B_M} = -\frac{R}{L-M}i_{B_M} + \frac{1}{L-M}(U_{B_M} - e_{B_M}) \\ \dot{i}_{C_M} = -\frac{R}{L-M}i_{C_M} + \frac{1}{L-M}(U_{C_M} - e_{C_M}) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} M_M &= \omega_M^{-1}(e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C); \\ \dot{\omega}_M &= J_M^{-1}(M_M - M_{\text{Н}}); M_{\text{Н}} = R_{\text{ВК}}(F_{\text{тр}} + F_a); \\ \dot{v} &= m^{-1}(R_{\text{ВК}}^{-1}M_M - F_{\text{тр}} - F_a); v = \omega_M R_{\text{ВК}}; \\ F_{\text{тр}}(\cdot) &= \mu(\cdot)F_{\text{норм}}; F_a(V) = K_a v^2, \\ e_S &= S_{\text{ИК}}^0 - S_{\text{ИК}}; \end{aligned}$$

$$u_S(t) = k_p e_S + k_i \int e_S(t) dt$$

где функция $f_{\text{EMF}}(\cdot)$ описывает трапецидальную форму ЭДС, $M_{\text{Н}}$ – момент нагрузки тягового двигателя, K_a – коэффициент аэродинамического сопротивления, $\mu(\cdot)$ – коэффициент сцепления в «пятне» контакта шины измерительного колеса с поверхностью, S_{PWM} – скважность ШИМ-сигнала, управляющего тормозным транзистором, $R_s(\cdot)$ – эквивалентное сопротивление бортовой сети, $S_{\text{ИК}}^0$ – заданная величина скольжения ИК, k_p, k_i – коэффициенты ПИ-регулятора скольжения.

Коэффициент сцепления является неопределенной характеристикой трущихся поверхностей, но обладает выраженным эффектом «сухого» трения с характерным спадающим «срывным» участком, возникающим при начале скольжения (эффект Штрибека), и в целом, аналитическая зависимость $\mu(S)$ может быть приблизительно определена следующим выражением:

$$\mu(S) = M_3 \exp(-M_2 S) + M_1 S + M_0, \quad (4)$$

где неопределенные числовые коэффициенты определяют характерные точки кривой $\mu(S)$:

$$\begin{cases} M_0 = \mu_{\text{min}}; M_1 = \mu_{\text{block}} - \mu_{\text{min}}; \\ M_2 = \frac{d}{S_{\text{min}}}; M_3 = \mu_{\text{max}} - \mu_{\text{min}}; \\ \mu_{\text{max}} = \mu(0); \mu_{\text{block}} = \mu(1); \mu_{\text{min}} = \mu(S_{\text{min}}); S_{\text{min}} = 0,05 \div 0,1. \end{cases}$$

где d – постоянная, определяющая крутизну кривой $\mu(S)$ в зоне эффекта Штрибека [15].

Можно заметить, что тяговая подсистема, отвечающая за движение с заданной скоростью, и измерительная подсистема, отвечающая за измерение коэффициента сцепления и поддержание заданного скольжения измерительного колеса, связаны как электрически, так и механически.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 показана упрощённая математическая модель, созданная в среде Simulink. Инерция приведена к валу электрических машин, нелинейности

трансмиссии и шины не учитываются, коэффициент сцепления постоянен. Для моделирования использованы параметры, указанные в табл. 1. Время моделирования

$t \in [0; 1]$ с. Внешний момент прикладывался в момент времени $t = 0.1$ с.

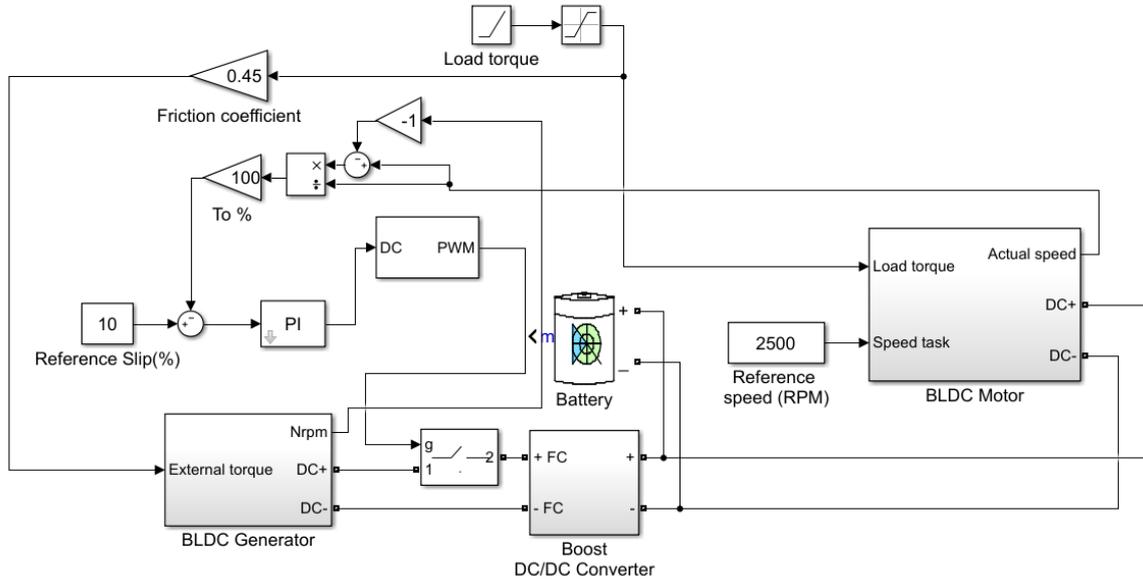


Рис. 2. Параметры моделирования Математическая модель системы управления скольжением

ТАБЛИЦА I.

Параметр	Обозначение	Величина	Единицы измерения
Номинальное напряжение батареи	U	48	В
Ёмкость батареи	C_B	100	Ач
Сопротивление обмотки фазы	R	$6,2e-3$	Ом
Индуктивность обмотки фазы	L	$68e-6$	Гн
Коэффициент момента	C_T	0.105	Нм/А
Число пар полюсов	p	4	-
Момент нагрузки	T	15	Нм
Задание скольжения	S^0	10	%
Заданная частота вращения ведущего колеса	ω_{BK}^0	2500	об/мин

В качестве генератора и двигателя применяются одинаковые электрические машины. Блок BLDC Motor содержит регулятор скорости движения измерителя. В данной работе система управления скоростью движения измерителя работает независимо от системы управления скольжением и подробно не рассматривается.

На рис. 3–5 представлены графики ошибки скольжения измерительного колеса при различных значениях коэффициента сцепления. Величина статической ошибки пропорциональна величине нагрузки. На рисунке 6 показан предельный случай, в котором система становится неработоспособной. По оси абсцисс откладывается время в секундах, а по оси ординат – значение ошибки скольжения e_S в процентах.

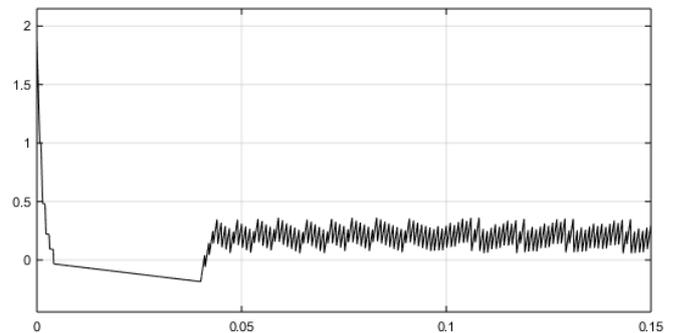


Рис. 3. График ошибки скольжения при $KC=0.3$ и моменте нагрузки двигателя 10 Нм.

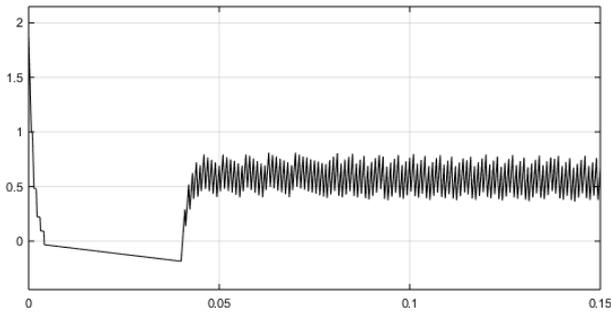


Рис. 4. График ошибки скольжения при $КС=0.45$ и моменте нагрузки двигателя 15 Нм.

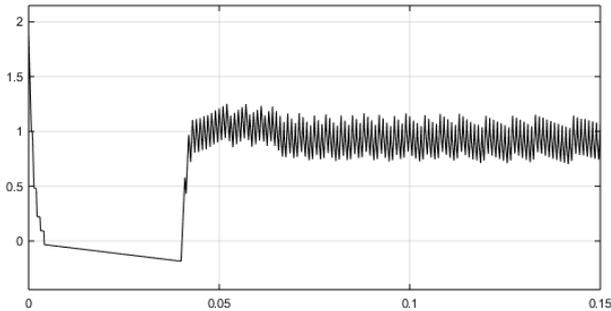


Рис. 5. График ошибки скольжения при $КС=0.6$ и моменте нагрузки двигателя 24 Нм

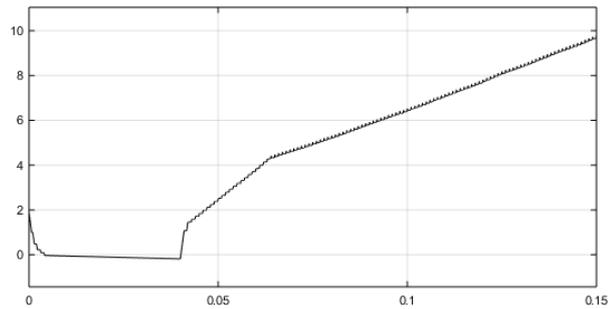


Рис. 6. График ошибки скольжения при $КС=0.8$ и моменте нагрузки двигателя 24 Нм

ПИ-регулятор не обеспечивает поддержание заданной величины скольжения в предельном режиме работы.

На рис.7 и 8 показаны график ошибки при ступенчатом изменении задания скольжения и график функции $u_s(t)$ управления, ограниченной диапазоном $[0; 1]$.

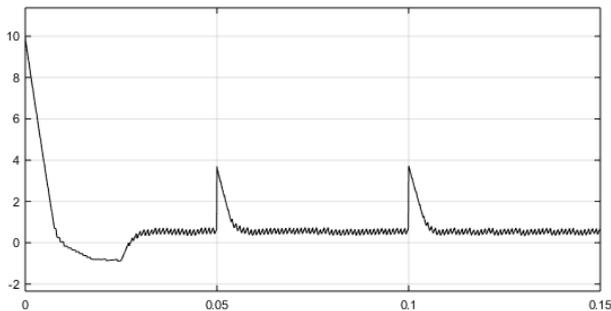


Рис. 7. График ошибки скольжения при $КС=0.45$, моменте нагрузки двигателя 15 Нм и ступенчатом увеличении задания скольжения - 10%, 13% и 16%.

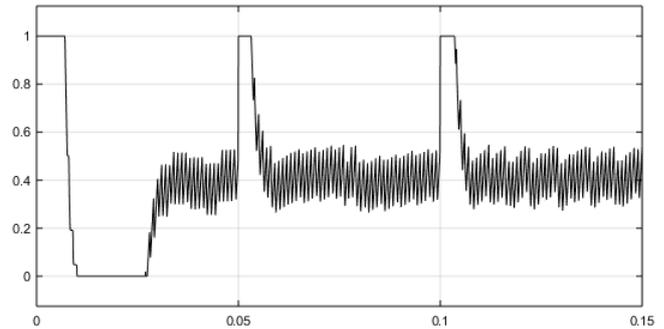


Рис. 8. График функции $u_s(t)$ при $КС=0.45$, моменте нагрузки двигателя 15 Нм и ступенчатом увеличении задания скольжения - 10%, 13% и 16%

ПИ-регулятор корректно обрабатывает изменение задания скольжения.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный регулятор не обеспечивает работу системы в предельном режиме работы при коэффициенте сцепления равном 0.8. Но при величине коэффициента сцепления 0.45 регулятор обеспечивает обработку задания за приемлемое время.

В будущем планируется внедрить нелинейности в разработанную модель и применить адаптивное управление скольжением при динамически меняющемся коэффициенте сцепления, зависящем от скольжения. А также учесть влияние процессов в тяговой подсистеме на электромагнитную динамику процессов в измерительной подсистеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Raut, Rushita & Saif, Shaikh & Kazi, Alsifa & Deshmukh, Vedant & Mundra, Prateek. (2023). A Novel Regenerative Braking Control of BLDC Motor Driven Electric Vehicle. 11. a981-a993
- [2] Калачёв Ю.Н. SimlnTech: моделирование в электроприводе. Москва: ДМК Пресс, 2019. 98 с. ISBN 978-5-97060-766-4. Глава 7 Управление моментом СДПМ с трапецеидальной ЭДС.
- [3] Deepak, M & ArulDavid, Ranjeev & Verma, Rajesh & Sathyasekar, K. & Barnawi, Abdulwasa & Bharatiraja. (2022). A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. IEEE Access. 10. 1-1. 10.1109/ACCESS.2022.3175011.
- [4] S.V. Gavrilov, D.T. Giang, N.D. Thanh. Control of electric drive with permanent magnet brushless motor. Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University Journal, ISSN 2071-8985, 2016. №8. p.53-62.
- [5] Калачев Ю.Н., Александров А.Г. Преобразователи автономных источников электроэнергии. Москва: ДМК Пресс, 2021. 80 с. ISBN 978-5-97060-920-0.
- [6] Самохвалов Д.В. Управление синхронными двигателями малой мощности. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 183 с. ISBN 978-5-7629-2802-1. Глава 3 Бесконтактные двигатели постоянного тока.
- [7] Bahrami, M., Mokhtari, H. and Dindar, A. (2019), Energy regeneration technique for electric vehicles driven by a brushless DC motor. IET Power Electronics, 12: 3397-3402. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0024>
- [8] A. Joseph Godfrey, V. Sankaranarayanan, A new electric braking system with energy regeneration for a BLDC motor driven electric vehicle, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 21, Issue 4, 2018, Pages 704-713, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.05.003>.
- [9] Mamur, Hayati & Candan, Alper. (2020). Detailed simulation of regenerative braking of BLDC motor for electric vehicles. Bilge

- International Journal of Science and Technology Research. 4. 10.30516/bilgesci.646901.
- [10] A.A. Laczko, M.V. Zaharia, M.M. Radulescu and S. Brisset, "Modeling and simulation of a brushless DC permanent-magnet generator-based wind energy conversion system," 2015 Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco, 2015, pp. 1-7, doi: 10.1109/EVER.2015.7113021.
- [11] Andreea-Adriana Laczko. Brushless DC permanent magnet micro-wind generator modeling and optimization over long-term wind-speed cycle operation. Other. Ecole Centrale de Lille; Universitatea tehnică (Cluj-Napoca, Roumanie), 2016. English.
- [12] Chen, Zhuihui et al. "A 2MW 6-phase BLDC generator developed from a PM synchronous generator for wind energy application." 2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) (2014): 110-114.
- [13] Abolfazl Halvaei Niasar, AmirHossein Sabbaghean, Design and implementation of a low-cost maximization power conversion system for brushless DC generator, Ain Shams Engineering Journal, Volume 8, Issue 4, 2017, Pages 571-580, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.11.001>.
- [14] Brushless Permanent Magnet Motor Design 2nd edition, Duane C. Hanselman, p. 186.
- [15] Друян Е.В. Автоматизированный электромеханический стенд для полунатурных испытаний буксируемых измерителей коэффициента сцепления: автореф. дис. ... канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012 г.