

технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы II Республиканской научно-технической конференции, 28–29 апреля 2022 г. / Белорус. Национальный технический университет [и др.] ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2022. – С. 433–437.

4. Контроль знаний студентов при изучении курса общей физики в рамках образовательной программы ТИПСЭАД-БНТУ / Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук, А. П. Ахмедов [и др.] // Высшая школа. – 2020. – № 3. – С. 26–28.

5. Fotouhi, A. A review on electric vehicle battery modelling: From lithium toward lithium–sulphur / A. Fotouhi, D. J. Auger, K. Propp [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 56. – P. 1008–1021. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.009>.

6. Nguyen, T. A. Stochastic Optimization of RenewableBased Microgrid Operation Incorporating Battery Operating Cost / T. A. Nguyen, M. L. Crow // IEEE Transactions on Power Systems. – 2016. – Vol. 31, №. 3. – P. 2289–2296.

УДК 621.3.011

Математическое моделирование вторичных источников питания тягового электропривода постоянного тока

Колесников И. К., Хакимов С. Х.

Ташкентский государственный транспортный университет
Ташкент, Республика Узбекистан

В статье рассматриваются вопросы математического моделирования вторичных источников питания для тягового электропривода постоянного тока. Разработана математическая модель, учитывающая особенности работы преобразовательных устройств, режимов зарядки накопителей энергии и характеристик нагрузки электропривода. Проведено моделирование переходных процессов при различных режимах функционирования системы с использованием современных методов численного анализа. Особое внимание уделено влиянию параметров вторичных источников на устойчивость и энергетическую эффективность тягового электропривода. Результаты моделирования могут быть использованы для оптимизации схемных решений и алгоритмов управления в системах электротранспорта. Представленные выводы подтверждают перспективность применения разработанных моделей для повышения надежности и эффективности вторичных источников питания в тяговых установках.

Разработана методика моделирования и исследованы электромагнитные процессы во вторичном источнике питания электропривода постоянного

тока силовых полупроводниковых преобразователей, которые были включены в замкнутую систему электропривода.

Задача была решена с применением библиотеки Simulink и Sim Power Systems средствами Matlab [1–3].

Разработана модель для исследования напряжения на конденсаторе во вторичном источнике питания тягового электропривода. Функциональная схема вторичных источников питания включает три системы: информационную, энерго-электронную и электромеханическую. В тяговом электродвигателе используются две системы: одноконтурная и двухконтурная [4; 5].

Были выбраны управляющие воздействия токами, чтобы можно было рассматривать как переходные, так и установившиеся процессы. Этому отвечает трапецеидальный сигнал со скоростью ω^* и ускорением $E^* = \frac{d\omega^*}{dt}$.

В исполнительном двигателе воздействиями являются: момент трения $M_H = M_c \sin(\omega)$; постоянный момент $M_H = \text{const}$; момент вязкого трения $M_H = B\omega$; шарнирный момент $M_H = K\alpha$. В выбранной модели учтены все эти моменты, хотя для поставленных условий устраивает $M_H = \text{const}$ [6–9].

Разберем одноконтурную структуру, показанную на рис. 1.

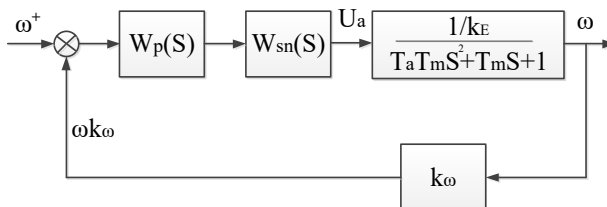


Рис. 1. Структурная схема одноконтурной системы вторичного источника питания

В одноконтурной системе применена отрицательная обратная связь по скорости. Электромагнитные и электромеханические процессы в исполнительном двигателе описываются уравнениями [10; 12]

$$\left. \begin{aligned} U_a &= R_a \left[T_a \left(\frac{di_a}{dt} \right) + i_a \right] + e_a \\ J \left(\frac{d\omega}{dt} \right) &= M - M_H \\ \omega &= \frac{d\alpha}{dt} \\ e_a &= K_E \omega; M = K_M i_a \end{aligned} \right\},$$

где U_a, i_a, e_a – напряжение, ток, против ЭДС якоря; $R_a, T_a = \frac{L_a}{R_a}, L_a$ – сопротивление, постоянная времени, индуктивность якоря; ω, M, M_H, α – угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки, угол поворота вала;

J, K_E, K_M – момент инерции ротора, коэффициенты определяемые конструктивными постоянными.

Передаточная функция исполнительного двигателя [11]:

$$W_{\text{ид}}(S) = \frac{\omega(S)}{U_a(S)} = \frac{1 / K_E}{T_a T_M S^2 + T_M S + 1},$$

$$T_M = J \frac{R_a}{K_E K_M}.$$

Тогда, согласно структурной схеме (рис. 1), силовой преобразователь представляет аperiodическое звено с передаточной функцией

$$W_{\text{сп}}(S) = \frac{K_{\text{сп}}}{T_{\text{сп}} S + 1},$$

$$T_{\text{сп}} = \frac{1}{f_K},$$

где $T_{\text{сп}}$ – обратная функции частоты коммутации f_K .

Постоянная времени силового преобразователя. Определяется частотой коммутации широтно – импульсного преобразователя. Всегда выполняется условие $T_{\text{сп}} \ll T_a$. В преобразователь входят: регулятор интегральный ПИ и регулятор интегрально – дифференциальный. В табл. 1 показаны параметры структурной схемы, в табл. 2 регуляторов [13].

Таблица 1

Параметры структурной схемы							
P_H , кВт	$U_a = U_f$, В	n_H , об/мин	C , мГн	R_a , Ом	R_f , Ом	L_{af} , Гн	J , кгм ²
4,5	110	3000	25	0,585	400	1,236	0,36

При синтезе регулятора будем считать, что постоянная времени

$$T = T_a + T_{\text{сп}}.$$

Если

$$W_p(S) = \frac{K_p(T_M S + 1)}{T_M S} = K_p + \frac{K_p}{T_M S} = K_{\Pi} + \frac{K_U}{S},$$

то передаточная функция будет иметь вид:

$$W(S) = \frac{\omega(S)}{U_a(S)} = \frac{1 / K_E}{(T_a S + 1)(T_M S + 1)}.$$

Таблица 2

Параметры структурной схемы

Параметры структурной схемы ПИ и ПИД регуляторов	$K_E = K_M$	T_a	T_M	K_{Π}	K_{Π}	$K_{\mathcal{D}}$	$T_{\mathcal{D}}$
ПИ	0,34	0,0427	1,8229	0,06	0,0337		0,36
ПИД	0,34	0,0427	1,8229	0,06142	0,3374	0,0247	0,0046

Большую постоянную времени компенсирует ПИ-регулятор:

$$W_p(S) = \frac{K_p(T_M S + 1)}{T_M S} = K_p + \frac{K_p}{T_M S} = K_{\Pi} + \frac{K_U}{S}.$$

Для разомкнутой системы

$$W_{\text{раз}}(S) = \frac{K_{\text{СП}} K_p K_{\omega} (T_M S + 1)}{T_M S} \cdot \frac{1 / K_E}{(T_a S + 1)(T_M S + 1)} = \frac{K_{\text{СП}} K_p K_{\omega} / K_E}{T_M S \cdot (T_1 S + 1)}.$$

Введем обозначения

$$a = \frac{T_M K_E}{T_a K_{\text{СП}} K_{\Pi} K_{\omega}}, \quad K_{\Pi} = K_p = \frac{T_M K_E}{a T_a K}, \quad K_U = \frac{K_p}{T_M}.$$

Для преобразователя интегрально-дифференциального

$$W_p(S) = K_{\Pi} + \frac{K_U}{S} + \frac{K_{\mathcal{D}} S}{T_{\mathcal{D}} S + 1} = \frac{K_U}{S} \cdot \frac{\frac{K_{\mathcal{D}} + T_{\mathcal{D}} K_{\Pi}}{K_U} S^2 + \frac{K_{\Pi} + T_{\mathcal{D}} + K_U}{K_U} S + 1}{T_{\mathcal{D}} S + 1}.$$

Характеристики в переходном режиме представлено на рис. 2 при различных значениях «а». Этот коэффициент обобщенного динамического режима.

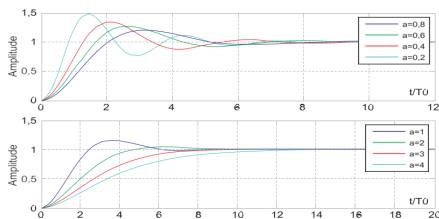


Рис. 2. Динамическая характеристика вторичного источника питания тягового электропривода

Рис. 2 выполнен в относительных единицах. Из рис. 2 видно, что при $a = 2$ характеристики имеют оптимальные значения. В замкнутой системе при оптимальных значениях имеют: перерегулирование $\delta = 4,3 \%$, время первого согласования $t_1 = 4,71T_0$, время переходного процесса $t_{пер} = 8,4T_0$. Параметры выбранного двигателя и регуляторов показаны в табл. 1 и 2 [7; 8].

Механическая характеристика при $M_H = \text{const}$ показана на рис. 3. Сигнал управления показан на рис. 3. Рабочая точка и ее изменение показано на рис. 3. Режим 1–1' соответствует генераторному режиму; 2–2' двигательному режиму, электромагнитному тормозу 3–3'. На конденсаторе во время переходного режима могут возникать перенапряжения (рис. 3) за счет того, что индуктивность накапливает энергию [17]:

$$W_L = \frac{L_a I_{\max}^2}{2} = \frac{L_a M_{\max}^2}{2K_M^2} = \frac{L_a (\gamma \varepsilon^*)}{2K_{\omega}^2 K_M^2}.$$

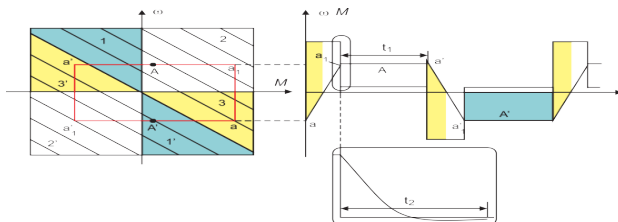


Рис. 3. Электромеханические и электромагнитные характеристики в одноконтурном тяговом двигателе

Результаты моделирования подтвердили возможность повышения энергетической эффективности и надежности тяговых электроприводов за счет оптимизации структуры вторичных источников и алгоритмов их управления. Проведенные расчеты и численные эксперименты показали, что грамотный выбор параметров вторичных источников питания позволяет существенно снизить динамические потери энергии, обеспечить стабильность напряжения на выходе и продлить срок службы элементов системы.

Разработанная модель может быть использована в качестве основы для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию архитектуры тяговых систем, разработку новых стратегий управления и совершенствование методов диагностики состояния вторичных источников питания.

Литература

1. Kolesnikov, I. K. The Choice of a Generalized Criterion for the Efficiency of an Automated Electric Drive of a Railway Rolling Stock / I. K. Kolesnikov, G. Sh. Abidova, S. H. Khakimov // Intelligent System for Industrial Automation (WCIS-2022): proceeding 12th World Conference Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – P. 281–288. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-53488-1_34 (дата обращения 12.03.2025).

2. Kolesnikov, I. K. Electric drive efficiency criterion for specific energy consumption. / I. K. Kolesnikov, A. P. Akhmedov, S. H. Nakimov // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы III Республиканской научн.-техн. конференции, г. Минск, 27–28 апреля 2023 г. / Белорус. национальный технический ун-т [и др.] ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2023. – С. 408–411.

3. Краснов, И. Ю. Методы и средства энергосбережения на промышленных предприятиях / И. Ю. Краснов. – Томск : Томский политехнический университет, 2012. – 186 с.

4. Faiz, M. B. Optimal design of three-phase InductionMotors and their comparison with a typical industrial motor / M. B Faiz, B. Sharifian // Computers and Electrical Engineering. – 2001. – Vol. 27. – P. 133–144.

5. Stević, Z. Supercapacitors as a Power Source in Electrical Vehicles / Z. Stević, M. Rajčić-Vujaninović // Electric Vehicles – The Benefits and Barriers. – Rijeka, 2011. – 168 p.

6. Хакимов, С. Х. Оценка эффективности асинхронного двигателя по поступающей от источника энергии / С. Х. Хакимов // Материалы 66 –й Международной научной конференции Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, 25–29 апр. 2022. – Астрахань, 2022. – С. 684–686.

7. Мачулин, П. С. Современные проблемы разработки электропривода / П. С. Мачулин. // Молодой ученый. – 2016. – № 10(114). – С. 273–275.

8. Нос, О. В. Оптимальное векторное управление асинхронным двигателем по критерию минимума токов статора / О. В. Нос // Электротехника, электромеханика и электротехнология ЭЭЭ – 2007 : материалы третьей научн.-тех. конф. с международным участием / Новосибирский государственный ун-т. – Новосибирск, 2007. – С. 79–85.

9. Kayumov, S. N. Chet el tajribasi asosida energiya tejankor asinxron dvigatellarni tayyorlash texnologiyalarining rivojlanishi / S. N. Kayumov, S. N. Hakimov // Transportda resurs tejankor texnologiyalar: proceeding, 2021. – P. 101 – 108.

10. Хакимов, С. Х. Энергосберегающие технологии контактов электрических аппаратов в энергетическом строительстве / С. Х. Хакимов, С. Н. Каюмов // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы II Республиканской научно-технической конференции, г. Минск, 28–29 апреля 2022 г. / Белор. национальный технический ун-т [и др.] ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2022. – С. 291–297.

11. Physical and thermal properties of binary (Bi-Ti-O)-TiO₂ UHF-ceramics / H. K. Sauchuk, N. P. Yurkevich, A. P. Akhmedov [et al.] // ICTEA International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, Toronto, May 28-June. – 2024. – Vol. 1., № 1. – URL: <https://journals.library.torontomu.ca/index.php/ictea/article/view/2158/1954> (дата обращения 03.03.2025).

12. Studying the magnetic field of a multilayer solenoid in the laboratory physics workshop / N. P. Yurkevich, Sauchuk G. K., Akhmedov A.P. [и др.] // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы Республиканской научно-технической конференции, г. Минск, 20–21 мая 2021 г. / Белор. национальный технический ун-т [и др.] ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2021. – С. 176–180.

13. Akhmedov, A. P. The use of solar panels to power the air conditioning and ventilation system of vans / A. P. Akhmedov, S. B. Khudoyberganov, N. P. Yurkevich // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы II Республиканской научно-технической конференции, г. Минск, 28–29 апр. 2022 г. / Белор. национальный технический ун-т [и др.] ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2022. – С. 393–397.