УДК 621.316

DOI: 10.53297/18293328-2021.1-22

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА “ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ - ДВИГАТЕЛЬ”, РАБОТАЮЩЕГО С ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

М.К. Багдасарян, Т.Э. Акопян

Национальный политехнический университет Армении

Представлены последствия износа и деформации звеньев, составляющих механическую часть системы электропривода, работающего с динамической нагрузкой. Приведены наиболее распространенные средства, позволяющие избежать нежелательных воздействий, вызываемых динамической нагрузкой.

Обосновано, что известные средства имеют практическое применение для синхронных систем электроприводов, работающих с динамической нагрузкой, а для асинхронных систем электроприводов они в основном неэффективны. Обосновано также, что улучшение асинхронной системы электропривода с динамической нагрузкой путем регулирования рабочих режимов является актуальной задачей.

Для разработки регулировочной модели механической части системы электропривода “технологический механизм – электродвигатель” была использована система дифференциальных уравнений, описывающих динамические явления электромеханической системы. С применением функции аппроксимации, характеризующей динамику момента сопротивления, учитывается изменение момента сопротивления, создаваемого технологическим механизмом.

Имитационная модель системы реализована в среде Simulink программного пакета Matlab. Для настройки системы спроектирован пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор, который был подключен к технологическому механизму. Получены передаточные функции системы для различных значений жесткости связи.

Проанализированы амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики после введения ПИД регулятора. Показано, что введение разработанного ПИД регулятора с целью сглаживания ударных воздействий, появляющихся в механической части системы электропривода “технологический механизм – электродвигатель”, работающего с динамической нагрузкой, позволяет избежать нежелательных явлений, возникающих в переходных процессах системы. Полученные результаты могут быть успешно

использованы для улучшения работы систем электроприводов, работающих со случайной, резко изменяющейся нагрузкой.

Ключевые слова: регулятор, динамическая нагрузка, частотные характеристики, переходный процесс.

Введение. Упругие звенья механической части системы электропривода “технологический механизм - электродвигатель”, работающего с динамической нагрузкой, подвергаются ударам, которые могут привести к износу конструктивных деталей и узлов. Это объясняется тем, что движущиеся массы, составляющие механическую часть системы электропривода, в частности, технологический механизм, передаточное звено и электродвигатель, находятся под воздействием резко изменяющейся нагрузки. В результате этого упругие звенья системы с течением времени могут деформироваться, изнашиваться или ломаться, оказываясь в аварийном режиме, и, в конце концов, выйти из строя [1].

В зависимости от характеристики изменения, нагрузки, возникающие в системе электропривода, различны. В частности, они могут проявляться в виде деформации, искривления, ослабления связей, смещения звеньев управления и механизмов [2].

Вследствие износа звеньев и узлов, составляющих механическую часть, жесткость связи системы “технологический механизм – электродвигатель” подвергается изменению, что способствует переходу системы в нестабильный режим.

Известно, что динамическая нагрузка вызывает резкие колебания момента и статорного тока двигателя, которые, в свою очередь, увеличивают электрические потери [3]. Последнее обусловлено тем, что момент сопротивления нагрузки в определенном временном промежутке может увеличить крутящий момент двигателя до максимальных значений и снизить его до значения, близкого к моменту холостого хода.

Во избежание нежелательных воздействий динамической нагрузки применяют различные средства, направленные на:

- усиление механической прочности деталей и узлов конструкции;
- обеспечение требований к жесткости узловых деталей связи;
- изоляцию конструкций, подвергающихся механическому удару. Для этого могут применяться компенсаторы, демпферы, прослойки и т.д.

Вышеотмеченные средства имеют практическое применение в системах синхронных электроприводов, работающих с динамической нагрузкой, а для асинхронных систем электроприводов они необходимы, но недостаточны.

Перегрузочная способность асинхронного двигателя при резком уменьшении напряжения сети падает. Ее возможно обеспечить за счет снижения частоты вращения, в результате чего падает производительность механизма [4].

Проведенный анализ показал, что улучшение системы асинхронного электропривода, работающего с динамической нагрузкой, посредством регулирования рабочих режимов механической части является актуальной задачей, представляющей научный интерес.

Целью работы является разработка имитационной модели регулирования механической части системы асинхронного электропривода, работающего с ударной нагрузкой.

Обоснование методики. В настоящей статье для разработки регулировочной модели механической части системы асинхронного электропривода была использована система дифференциальных уравнений, описывающих динамические явления в электромеханической системе [3]:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} - M_{12} = -M_c, \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + M_{12} = M_D - \beta \omega_2, \\ M_{12} = \frac{c_l}{p} (\omega_2 - \omega_1), \end{cases} \quad (1)$$

где J_1 и J_2 - моменты инерции соответственно технологического механизма и ротора асинхронной машины; ω_1 и ω_2 - скорости вращения технологического механизма и электродвигателя; c_l - жесткость звена передачи привода между технологическим механизмом и электродвигателем; M_c - момент сопротивления технологического механизма; M_D - момент асинхронного двигателя; M_{12} - момент нагрузки упругого элемента; p - оператор дифференцирования; β - жесткость характеристики асинхронного двигателя.

Для учета изменения момента сопротивления нагрузки технологического механизма в системе уравнений (1) использовалась разработанная нами функция аппроксимации, характеризующая динамику момента [5].

Разработка имитационной модели была реализована в среде Simulink программного пакета Matlab [6].

Результаты исследования. В работе были использованы система уравнений движения электропривода (1) и полученная нами функциональная зависимость момента сопротивления технологического механизма [6]. Для настройки системы

разработан ПИД регулятор (рис.1), передаточная функция которого имеет следующий вид [7, 8]:

$$PID(s) = P + I \frac{1}{s} + sD,$$

где P - пропорциональный коэффициент усиления; I - интегральный коэффициент усиления; D - дифференциальный коэффициент усиления.

Рис. 1. Структурная схема ПИД регулятора

На рис.2 представлен блок получения параметров ПИД регулятора в среде Matlab.

Рис. 2. Блок получения параметров ПИД регулятора

Для рассматриваемого случая получены следующие значения коэффициентов ПИД регулятора: $P = 0,21425$, $I = 0,046715$, $D = 30,4094$.

В результате передаточная функция ПИД регулятора принимает вид [5]

$$PID(s) = \frac{30,4094s^2 + 0,21425s + 0,046715}{s}$$

Подключив разработанный ПИД регулятор к технологическому механизму, получим регулировочную модель системы асинхронного электропривода, работающего с динамической нагрузкой (рис.3).

Рис. 3. Регулировочная модель системы асинхронного электропривода с динамической нагрузкой

Исследованы функции $W_{11}(s) = M_{12}(s)/M_D(s)$ и $M_{22}(s) = M_{12}(s)/M_c(s)$ системы после введения ПИД регулятора.

Передаточная функция $W_{11}(s)$ при различных значениях жесткости связи c_1 принимает следующий вид:

$$W_{11}(s) = \frac{40s^3 + 1216s^2}{s^5 + 54,81s^4 + 869,6s^3 + 3710s^2 + 8943s + 5770} \quad \text{при } c_1 = 15000 \text{ кг.м/рад},$$

$$W_{11}(s) = \frac{68s^3 + 2068s^2}{s^5 + 54,81s^4 + 958,9s^3 + 6307s^2 + 15200s + 9810} \quad \text{при } c_1 = 25500 \text{ кг.м/рад},$$

$$W_{11}(s) = \frac{80s^3 + 2433s^2}{s^5 + 54,81s^4 + 997,2s^3 + 7420s^2 + 17890s + 11540} \quad \text{при } c_1 = 30000 \text{ кг.м/рад}.$$

Передаточная функция $W_{22}(s)$ при различных значениях жесткости связи c_1 принимает следующий вид:

$$W_{22}(s) = \frac{87,58s^3 + 2494s^2 + 8943s + 5770}{s^5 + 54,81s^4 + 869,6s^3 + 3710s^2 + 8943s + 5770} \quad \text{при } c_1 = 15000 \text{ кг.м/рад},$$

$$W_{22}(s) = \frac{148,9s^3 + 4239s^2 + 15200s + 9810}{s^5 + 54,81s^4 + 958,9s^3 + 6307s^2 + 15200s + 9810} \quad \text{при } c_1 = 25500 \text{ кг.м/рад},$$

$$W_{22}(s) = \frac{175,2s^3 + 4988s^2 + 17890s + 11540}{s^5 + 54,81s^4 + 997,2s^3 + 7420s^2 + 17890s + 11540} \quad \text{при } c_1 = 30000 \text{ кг.м/рад}.$$

Полученные передаточные функции позволяют оценить стабильность системы после введения ПИД регулятора. Получены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики передаточных функций $W_{11}(s)$ и $W_{22}(s)$ и кривые Найквиста для различных значений жесткости связи (рис.4 -7).

Рис. 4. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики передаточной функции $W_{11}(s)$ для различных значений жесткости связи c_1

Рис. 5. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики передаточной функции $W_{22}(s)$ для различных значений жесткости связи c_1

Рис. 6. Кривые Найквиста передаточной функции $W_{11}(s)$ для различных значений жесткости связи c_1

Рис. 7. Кривые Найквиста передаточной функции $W_{22}(s)$ для различных значений жесткости связи c_1

Из рис. 6 и 7 следует, что кривые Найквиста не включают координату $(-1, j0)$, что позволяет утверждать о стабильности системы.

Исследованы переходные процессы системы после введения ПИД регулятора (рис. 8, 9).

Рис. 8. Кривые переходных процессов передаточной функции $W_{11}(s)$ в случае введения ПИД регулятора

Рис. 9. Кривые переходных процессов передаточной функции $W_{22}(s)$ в случае введения ПИД регулятора

Анализ полученных результатов показывает, что в результате введения ПИД регулятора рабочие режимы системы улучшаются (см. табл.).

Таблица

Характеристические параметры переходных процессов системы
“технологический механизм – электродвигатель” в случае введения ПИД регулятора

Жесткость связи, c_l , кг.м/рад	Время роста, c	Время стабилизации, c	Перерегулирование, %
15000	0,313	1,79	24,7
25500	0,239	2,52	11,1
30000	0,22	2,63	7,99

Заключение. Введение разработанного ПИД регулятора с целью смягчения ударных воздействий, появляющихся в механической части системы электропривода “технологический механизм – электродвигатель”, работающего с динамической нагрузкой, позволяет избежать нежелательных явлений, возникающих в переходных процессах системы.

Проведенные исследования на основе разработанной имитационной модели показали значительное снижение перерегулирования и времени стабилизации системы.

Литература

1. **Xiaoguang Z.L., Zhengxi Li.** Sliding-mode observer-based mechanical parameter estimation for permanent magnet synchronous motor // IEEE Trans. Power Electron. - 2016. - 31(8). - P. 5732–5745.
2. **Доросинский А.Ю., Герасимов О.Н., Артамонов Д.В.** Влияние ударных нагрузок на конструкционные материалы и проволочные резисторы //Надежность и качество сложных систем. – 2017. - №3 (19). - С. 33–36.
3. **Baghdasaryan M.K., Sargsyan S.V., Hakobyan T.E.** A Research Model for the Operating Modes of the Mechanical Part of the Ore Crusher Electrical Drive System // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. - 2019. - № 11–12. - P. 52–61.
4. **Clemens Müller, Ulrich Schwarzer.** Motor Handbook. - Munich, Germany, 2019. - 110 p.
5. **Baghdasaryan M.K., Hakobyan T.E.** Model for Regulating the Mechanical Part of an Asynchronous Electrical Drive Under Percussive Load // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. - 2020. -Vol. 12. - P. 538–551.
6. Modeling the load moments of electric motors in MATLAB /**R.T. Schreiner, A.A. Emelyanov**, et al //Young Scientist. - 2010. - Vol.1, 8(19). - P. 6 – 12.
7. **Unbehauen Heinz D.** Control Systems, Robotics and Automation. – Vol. X: Advanced Control Systems -IV. - EOLSS Publications, 2009. -332 p.
8. **Rames C. Panda.** Introduction to PID Controllers: Theory, Tuning and Application to Frontier Areas. - 2012. - 272 p.

*Поступила в редакцию 15.03.2021.
Принята к опубликованию 15.07.2021.*

ԴԻՆԱՄԻԿ ԲԵՌՈՎ ԱՇԽԱՏՈՂ «ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄ-ՇԱՐժԻՉ» ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՄԱՍԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐԻՉԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Մ.Ք. Բաղդասարյան, Տ.Է. Հակոբյան

Ներկայացվել են դինամիկ բեռով աշխատող էլեկտրաբանեցման համակարգի մեխանիկական մասը կազմող օղակների մաշման և դեֆորմացման հետևանքները: Բերվել են դինամիկ բեռի առաջացրած անցանկալի ազդեցություններից խուսափելու առավել տարածված միջոցները:

Ցույց է տրվել, որ հայտնի միջոցները գործնական կիրառություն կարող են ունենալ դինամիկ բեռով աշխատող սինքրոն էլեկտրաբանեցման համակարգերի դեպքում, իսկ ասինքրոն էլեկտրաբանեցման համակարգերի դեպքում դրանք հիմնականում անարդյունավետ են: Հիմնավորվել է, որ դինամիկ բեռով ասինքրոն էլեկտրաբանեցման

համակարգի բարելավումը մեխանիկական մասի աշխատանքային ռեժիմների կարգավորման ճանապարհով արդիական խնդիր է:

«Տեխնոլոգիական մեխանիզմ – շարժիչ» համակարգի մեխանիկական մասի կարգավորման մոդելի մշակումն իրականացնելու համար օգտագործվել է էլեկտրամեխանիկական համակարգի դինամիկ երևույթները բնութագրող դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգը: Բեռի մոմենտի դինամիկական բնութագրող ապրոքսիմացման ֆունկցիայի կիրառմամբ հաշվի է առնվել տեխնոլոգիական մեխանիզմով ստեղծված դիմադրող մոմենտի փոփոխությունը:

Համակարգի իմիտացիոն մոդելի մշակումն իրականացվել է Matlab ծրագրային փաթեթի Simulink միջավայրում: Համակարգի կարգաբերման համար նախագծվել է համեմատական-ինտեգրալ-դիֆերենցիալ (ՀԻԴ) կարգավորիչ, որը միացվել է տեխնոլոգիական մեխանիզմին: Ստացվել են համակարգի փոխանցման ֆունկցիաները կապի կոշտության տարբեր արժեքների դեպքում:

Գնահատվել են համակարգի ամպլիտուդահաճախային և ֆազահաճախային բնութագրերը ՀԻԴ կարգավորիչի ներմուծումից հետո: Հաստատվել է, որ համակարգն ապահովում է գերկարգավորման զգալի հնարավորություն, ինչպես նաև կայունացման փոքր ժամանակ: Ցույց է տրվել, որ դինամիկ բեռի տակ աշխատող «տեխնոլոգիական մեխանիզմ – շարժիչ» համակարգի մեխանիկական մասում առաջացող հարվածային ազդեցությունների մեղմման նպատակով ՀԻԴ կարգավորիչի ներմուծումը թույլ է տալիս խուսափել անցումային պրոցեսների ժամանակ առաջացող անցանկալի երևույթներից: Ստացված արդյունքները կարելի է հաջողությամբ օգտագործել պատահականորեն և կտրուկ փոփոխվող բեռով մեխանիզմների էլեկտրաբանեցման համակարգերի աշխատանքի բարելավման համար:

Առանցքային բառեր. կարգավորիչ, դինամիկ բեռ, հաճախականային բնութագրեր, անցումային պրոցես:

MODELING THE REGULATOR OF THE MECHANICAL PART OF THE “TECHNOLOGICAL MECHANISM-MOTOR” SYSTEM WORKING UNDER A DYNAMIC LOAD

M.K. Baghdasaryan, T.E. Hakobyan.

The consequences of wear and deformation of links, making up the mechanical part of an electric drive system, operating with a dynamic load are presented. The most common means are given to avoid the undesirable effects caused by a dynamic load.

It is substantiated that the known means have practical application for synchronous systems of electric drives, operating with a dynamic load, while for asynchronous systems of electric drives, they are generally ineffective. It is also substantiated that improving the asynchronous system of an electric drive with a dynamic load by regulating the operating modes is an urgent task.

To develop a regulating model of the mechanical part of the system electric drive "technological mechanism-electric motor", a system of differential equations, describing the

dynamic phenomena of an electromechanical system was used. By using the approximation function, characterizing the dynamics of the moment of resistance, the change in the moment of resistance created by the technological mechanism is taken into account.

The simulation model of the system is implemented in the Simulink environment of the Matlab software package. To adjust the system, a proportional-integral-derivative (PID) controller was designed, which was connected to the technological mechanism. The transfer functions of the system are obtained for various values of the coupling stiffness.

The amplitude-frequency and phase-frequency characteristics after the introduction of the PID controller are analyzed. It is shown that the introduction of the developed PID regulator for softening the shock impacts, arising in the mechanical part of the system "technological mechanism - electric motor", operating with a dynamic load, allows to avoid the undesirable phenomena occurring in the transient processes of the system. The results obtained can be successfully used to improve the operation of the systems of electric drives of mechanisms operating with a random, abruptly changing load.

Keywords: regulator, dynamic load, frequency characteristics, transient process.