СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ НАГРУЗКИ

Н.А. Малёв, О.В. Погодицкий

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

maleeev@mail.ru

Резюме: Исследование функционирования электрических машин в переходных режимах является актуальной задачей. Моделирование динамических процессов при изменяющихся параметрах нагрузки и вероятностная оценка результатов моделирования позволяют учесть степень влияния этих изменений на переходные характеристики. Показан подход для исследования динамики асинхронного электромеханического преобразователя в условиях внешних и параметрических возмущений и даны рекомендации по его использованию при решении задачи идентификации параметров электрических машин.

Ключевые слова: асинхронный электромеханический преобразователь, параметры нагрузки, переходный процесс, моделирование, статистический анализ, математическое ожидание.

DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-120-130.

Для цитирования: Малёв Н.А., Погодицкий О.В. Статистический анализ динамических характеристик асинхронного электромеханического преобразователя с изменяющимися параметрами нагрузки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 120-130. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-120-130.

STATISTICAL ANALYSIS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR WITH CHANGING LOAD PARAMETERS

N.A. Malev, O.V. Pogoditsky

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

maleeev@mail.ru

Abstract: Research of operation electrical machines in transitional mode is an actual task. Modeling dynamic processes with changing load parameters and probabilistic assessment of simulation results allows taking into account the degree of influence of these changes on transient response. An approach to the study of the dynamics of an asynchronous electrical motor under external and parametric perturbations shown. Recommendations was given on the use of this method in solving the problem of identifying the parameters of electric machines.

Keywords: asynchronous electrical motor, load parameters, transition process, modeling, statistical analysis, expected value.

For citation: N.A. Malev, O.V. Pogoditsky. Statistical analysis of dynamic characteristics asynchronous electric motor with changing load parameters. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2019. vol. 21. № 1-2. pp.120-130. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-120-130.

Исследование динамических характеристик электрических машин является актуальной задачей, поскольку особенности переходных процессов зачастую играют ведущую роль при определении установленной мощности, массогабаритных показателей оборудования и электромагнитных нагрузок электрических машин. Характер переходных процессов зависит от параметров, входящих в уравнения электромеханического преобразования энергии в виде коэффициентов перед переменными состояния, а также от параметров нагрузки. Наиболее показательными являются процессы пуска асинхронных двигателей серии 4А мощностью 10–75 кВт [1].

Следует отметить, что момент нагрузки M_c на валу двигателя в общем случае является случайной функцией или функцией времени [2]. При осуществлении технологических процессов, связанных с обработкой масс, поступающих к исполнительным органам рабочих машин или выходящих от них в виде некоторого продукта, переменными являются инерционные параметры электромеханической системы (масса, момент инерции), например, в приводах рулонов, барабанов, веретен с наматывающимися на них или разматывающимися с них нитями, полотнами, проволоками, лентами.

Целью настоящего исследования является статистический анализ влияния изменений параметров нагрузки (приведенных момента сопротивления M_c и момента инерции J) асинхронного электромеханического преобразователя (АЭМП), описанного системой дифференциальных уравнений (1) в синхронных вращающихся координатных осях x , y [3] на его динамические характеристики.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{1x}}{dt} &= u_{1x} - \frac{R_1 L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1x} + \frac{R_1 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2x} + \omega_{0эл} \Psi_{1y}; \\ \frac{d\Psi_{1y}}{dt} &= u_{1y} - \frac{R_1 L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1y} + \frac{R_1 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2y} - \omega_{0эл} \Psi_{1x}; \\ \frac{d\Psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R'_2 L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2x} + \frac{R'_2 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1x} + (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \Psi_{2y}; \\ \frac{d\Psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R'_2 L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2y} + \frac{R'_2 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1y} - (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \Psi_{2x}; \\ M &= \frac{p_\Pi L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} (\Psi_{1y} \Psi_{2x} - \Psi_{1x} \Psi_{2y}); \\ \frac{d\omega_{эл}}{dt} &= \frac{M - M_c(t)}{J(t)}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В приведенных уравнениях индексы 1 соответствуют потокоцеплениям Ψ , индуктивностям L , активным сопротивлениям R обмотки статора, а индексы 2 – обмотке ротора. Пятое уравнение системы (1) является нелинейным, поскольку электромагнитный вращающий момент M зависит от произведения соответствующих потокоцеплений. Шестое уравнение является уравнением механического равновесия и учитывает параметры нагрузки.

Для детального анализа влияния момента инерции и момента сопротивления на динамику АЭМП построена структурная схема электромеханического преобразования энергии в асинхронном двигателе (рис. 1), из которой следует, что динамические процессы зависят от перекрестных связей, образованных по соответствующим координатам.

Данная схема позволяет проанализировать тенденции изменения выходных координат асинхронной машины (момента M и скорости ω) при изменении указанных параметров нагрузки. Параметры модели задаются в командном окне *MatLab* и могут быть произвольно изменены в соответствии с решаемой задачей.

Паспортные данные и необходимые значения параметров двигателя типа 4А180М4 представлены в табл. 1 [1].

Таблица 1

Паспортные данные и значения параметров двигателя 4А180М4

U_{ϕ} , В	$2p_n$	R_1 , Ом	R_2 , Ом	L_1 , Гн	L_2 , Гн	L_{12} , Гн	$J_{дв}$, кг·м ²
220	4	0,16	0,078	0,05	0,051	0,0489	0,2245

Примем к рассмотрению гипотезу, что момент сопротивления и момент инерции нагрузки являются случайными величинами с нормальным законом распределения.

Для расчета случайного распределения приведенного момента инерции воспользуемся следующей программой в *MatLab*:

```
Jmin=0,2245; % нижняя граница диапазона;
Jmax=0,3143; % верхняя граница диапазона;
Jvar=Jmin+(Jmax-Jmin)*rand(1,30) % матрица случайных значений размерностью (1x30).
```

Рис. 1. Структурная схема электромеханического преобразования энергии в асинхронном двигателе

График изменений момента инерции показан на рис. 2.

Рис. 2. График изменений момента инерции

Аналогично рассчитаем момент нагрузки:
 $M_{\min}=30$; % нижняя граница диапазона
 $M_{\max}=70$; % верхняя граница диапазона
 $M_{\text{cvar}}=M_{\min}+(M_{\max}-M_{\min})*\text{rand}(1,30)$ % матрица случайных значений
 размерностью (1x30).

График изменений момента нагрузки показан на рис. 3.

Рис. 3. График изменений момента нагрузки

Полученные 30 значений изменяющихся величин задаем в виде вектора-строки в блоках $\text{Gain } M_c(t)$ и $1/J(t)$ (см. рис. 1).

Для моделирования пуска АЭМП с переменными моментом нагрузки и моментом инерции целесообразно осуществить дискретную аппроксимацию аналоговой структуры, показанной на рис. 1, что позволяет получить устойчивый процесс решения в виде графиков выходных переменных M и ω при условии задания 30 значений M_c и J согласно нормального распределения.

В соответствии с методом трапеций выходная координата

$$y(n) = y(n-1) + K[t(n) - t(n-1)][u(n) + u(n-1)]/2,$$

т.е. блоки непрерывных интеграторов $1/s$ заменяем на блоки интеграторов дискретного времени *Discrete-Time Integrator* с периодом дискретности 0,001 с. Данное обстоятельство позволит получить массив данных результатов моделирования в табличной форме для дальнейшей статистической обработки.

С целью сохранения результатов моделирования в рабочей области (*Workspace*), необходимо на панели *Parameters* осциллографа *Scope* во вкладке *History* отметить действие *Save Data to workspace* (рис. 4). Результаты будут доступны в рабочей области в виде массивов *ScopeData* (рис. 5).

Рис. 4. Окно модели блока *Scope*

Workspace	
Name ▲	Value
J	0.2245
L1	0.0500
L12	0.0489
L2	0.0510
R1	0.1600
R2	0.0780
ScopeData	2001x31 double
ScopeData10	2001x31 double
ScopeData2	2001x2 double
ScopeData3	2001x31 double
ScopeData5	2001x31 double
ScopeData6	1x1 struct
tout	1000x1 double
w	2001x31 double

Рис. 5. Окно рабочей области (workspace)

Графики переходных процессов пуска при различных значениях параметров нагрузки показаны на рис. 6–9.

Анализ результатов моделирования показывает, что указанные изменения сказываются на установившихся значениях скорости вращения ω и вращающего момента M , а также влияют на время пуска АЭМП и колебательность переходного процесса.

На рис. 8, 9 показаны графики переходных процессов, характеризующих дополнительное движение под действием изменяющихся параметров нагрузки.

Невязку можно представить в виде выражения

$$\Delta X(t) = X_{\text{э}}(t) - X_{\text{возм}}(t),$$

где координата $X_{\text{э}}(t)$ отражает эталонный переходный процесс, а $X_{\text{возм}}(t)$ – переходный процесс при наличии возмущения.

$\omega(t)$, рад/с

Рис. 6. Графики зависимостей $\omega(t)$ при пуске

$M(t)$, Н·м

Рис. 7. Графики зависимостей $M(t)$ при пуске

Полученные графики позволяют провести детальный статистический анализ с определением математического ожидания и среднеквадратического отклонения.

Сохраненные данные необходимо транспонировать с применением апострофа ($E = A'$; % E – транспонированная матрица A) для получения массива размерностью 31×2001 , где значение 2001 соответствует номерам отсчётов $k = 0 \dots 2001$. Переход к единицам времени осуществляется по формуле $t = k/1000$.

Статистический анализ результатов моделирования выполняется согласно приведенной программы с помощью соответствующих операторов.

```
v=[·]; % значения скорости вращения размерностью 2001x31
w=v'; % значения скорости вращения размерностью 31x2001
mw=mean(w); % математическое ожидание скорости вращения
plot(mw) % график математического ожидания скорости вращения
```

$\Delta\omega(t)$, рад/с

Рис. 8. Графики невязки $\Delta\omega(t)$, характеризующие дополнительное движение

$\Delta M(t)$, Н·м

Рис. 9. Графики невязки $\Delta M(t)$, характеризующие дополнительное движение

```
dv=[·]; % значения невязки скорости вращения размерностью 2001x31
dw=dv'; % значения невязки скорости вращения размерностью 31x2001
mdw=mean(dw); % математическое ожидание невязки скорости вращения
plot(mdw) % график математического ожидания невязки скорости вращения
```

```
Sw=std(w); % среднеквадратическое отклонение скорости вращения
plot(Sw) % график среднеквадратического отклонения скорости вращения
```

```
Sdw=std(dw); % среднеквадратическое отклонение невязки скорости вращения
plot(Sdw) % график среднеквадратического отклонения невязки скорости вращения
```

Аналогичные программы записываются для вероятностной оценки изменений вращающего момента.

Результаты моделирования представлены на рис. 10 – 13.

На рис. 10 показан график математического ожидания скорости вращения

$$m_x = \bar{\omega} = \frac{\omega_1 + \dots + \omega_i + \dots + \omega_n}{n}, n = 30$$

в зависимости от дискретных отсчетов k . Переход к единицам времени осуществляется по формуле $t = k/1000$.

$\bar{\omega}$, рад/с

Рис. 10. График математического ожидания скорости вращения $\bar{\omega}$

Из рисунка видно, что график математического ожидания $\bar{\omega}$ АЭМП характеризуется отсутствием перерегулирования и установившимся значением 153 рад/с, что соответствует среднему значению скорости вращения при случайных изменениях параметров нагрузки. Время установления «усредненного» переходного процесса относительно велико и составляет около 1,5 с, т.е. отвечает максимальному первому времени достижения установившегося значения при исследуемых изменениях параметров нагрузки (см. рис. 6).

Рис. 11 иллюстрирует среднее значение невязки скорости вращения, максимальная величина которого достигает 62 рад/с через 0,83 с. Математическое ожидание невязки $\Delta \bar{\omega}$ положительно во всем диапазоне времени моделирования, что говорит о преобладающем влиянии на характер переходного процесса по скорости вращения изменений момента инерции, поскольку последний варьировался от минимального значения только в сторону увеличения, способствуя увеличению длительности переходного процесса и обуславливая положительный знак невязки. Установившееся значение математического ожидания $\Delta \bar{\omega}$ равно нулю.

Рис. 11. График математического ожидания невязки скорости вращения

Рис. 12. График математического ожидания вращающего момента M

График математического ожидания вращающего момента характеризуется меньшими значениями положительного и отрицательного максимумов момента по сравнению с графиками на рис. 7, а также «сглаженностью» переходного процесса, т.е. отсутствием выраженных колебаний при пуске на 0,6...1,6 с моделирования. Среднее установившееся значение момента составляет около 50 Н·м, что соответствует номинальной нагрузке.

Показанный на рис. 13 график иллюстрирует влияние вариаций момента нагрузки M_c и характеризуется нескомпенсированными знакопеременными колебаниями на 0,8...0,9 с моделирования. При этом среднее установившееся значение невязки стремится к нулю, т.е. изменения M_c в заданном диапазоне не являются критичными.

Предложенный подход для исследования влияния вариаций параметров нагрузки позволяет обеспечить проведение статистического анализа математической модели электрической машины и на его основании определить косвенные зависимости, необходимые для идентификации параметров при воздействии внешних и параметрических возмущений, обусловленных особенностями эксплуатации АЭМП.

$\Delta \bar{M}$, Н·м

Рис. 13. График математического ожидания невязки $\Delta \bar{M}$

Литература

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / И.П. Копылов. М.: Высшая школа, 2001. 327 с.: ил.
2. Мелкозеров П.С. Энергетический расчет систем автоматического управления и следящих приводов / П.С. Мелкозеров. Москва: Энергия, 1968.
3. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / В.И. Ключев. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.: ил.
4. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. СПб: Корона-Век, 2014. 368 с.
5. Литовченко В.В., Малютин А.Ю., Невинский А.В. Анализ работы вспомогательных машин на электровазах переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2015. №1. С 36–40.
6. Пустоветов М.Ю. Имитационное моделирование вспомогательного асинхронного электропривода электроваза // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2015. №2 (19). С. 67–78.
7. Погодицкий О.В., Малёв Н.А. Проектирование мехатронных систем. В 2 ч. Ч. 1. Анализ и синтез: учебное пособие / О.В. Погодицкий, Н.А. Малёв. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. 312 с.
8. Статистический анализ моделей с переменной структурой / С.А. Айвазян, А.Н. Березняцкий, Б.Е. Бродский, Б.С. Дарховский // Прикладная эконометрика. 2015. Т. 39, № 3. С. 84–105.
9. Benidris M., Cai N., Mitra J. A fast transient stability screening and ranking tool. Proceedings of the Power Systems Computation Conference (PSCC'14), Wroclaw, Poland, August. 2014.
10. Mitra J., Benidris M. and Cai N. Use of homotopy-based approaches in finding Controlling Unstable Equilibrium Points in transient stability analysis // IEEE Power Systems Computation Conference (PSCC), pp. 1–7, June 2016.
11. Oluic M., Ghandhari M. and Berggren B. Methodology for rotor angle transient stability assessment in parameter space. // IEEE Trans. Power Syst. Vol. 32, No. 2. P. 1202–1211, May 2016.
12. Kim S., Overbye T.J. Mixed transient stability analysis using AC and DC models // IEEE Trans. Power Syst. Vol. 31, No. 2. P. 942–948, March 2016.
13. Илюхин Ю.В. Компьютерное управление мехатронными системами: учебное пособие / Ю.В. Илюхин. М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2014. 320 с.
14. Пятибратов Г.Я., Барыльник Д.В., Сухенко Н.А. Математические модели и идентификация электромеханических систем: учеб. пособие. Новочеркасск: Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ), 2014. 158 с.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Kopylov I.P. Mathematical modeling of electrical machines: Proc. for universities. - 3rd ed. / I.P. Kopylov. – M.: Higher School, 2001. – 327 p.
2. Melkozerov P.S. Energy calculation of automatic control systems and servo drives / P.S. Melkozerov. – Moscow: Energy, 1968.
3. Klyuchev V.I. Electric Drive Theory: Textbook for universities. - 2nd ed./ V.I. Klyuchev. - M.: Energoatomizdat, 2001. - 704 p.
4. Herman-Galkin, S.G. Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC / S.G. Herman-Galkin. - St. Petersburg: Corona-Vek, 2014. - 368 p.
5. Litovchenko V.V., Malyutin A.Yu., Nevinsky A.V. Analysis of the work of auxiliary machines on AC electric locomotives // Electronics and electrical equipment of transport. 2015. №1. Pp. 36-40.
6. Pustovetov M.Yu. Simulation modeling of auxiliary asynchronous electric drive of electric locomotive // Bulletin of the Amur State University. Sholem Aleichem. 2015. № 2 (19). Pp. 67-78.
7. Pogoditsky O.V., Malev N.A. Designing mechatronic systems. In 2 hours. Part 1. Analysis and Synthesis: study guide / O.V. Pogoditsky, N.A. Malev. - Kazan: Kazan state energy university Press, 2018. - 312 p.
8. Statistical analysis of models with variable structure / S. A. Ayvazyan, A. N. Berezhnyatsky, B. E. Brodsky, B. S. Darhovsky // Applied Econometrics. - 2015. - V. 39, № 3. - P. 84-105.
9. Benidris, M., Cai, N., Mitra, J. A fast transient stability screening and ranking tool. Proceedings of the Power Systems Computation Conference (PSCC'14), Wroclaw, Poland, August 2014.
10. Mitra, J., Benidris, M., and Cai, N. Use of homotopy-based approaches in finding Controlling Unstable Equilibrium Points in transient stability analysis. IEEE Power Systems Computation Conference (PSCC), pp. 1–7, June 2016.
11. Oluic, M., Ghandhari, M., and Berggren, B. Methodology for rotor angle transient stability assessment in parameter space. IEEE Trans. Power Syst., Vol. 32, No. 2, pp. 1202–1211, May 2016.
12. Kim, S., Overbye, T. J. Mixed transient stability analysis using AC and DC models. IEEE Trans. Power Syst., Vol. 31, No. 2, pp. 942–948, March 2016.
13. Ilyukhin Yu.V. Computer management of mechatronic systems: schoolbook / Yu.V. Ilyukhin. - Moscow: MSTU "Stankin", - 2014. - 320 p.
14. Pyatibratov G.Ya., Barylnik D.V., Sukhenko N.A. Mathematical models and identification of electromechanical systems: Schoolbook. Novocherkassk: South-Russian State Polytechnic University, 2014. 158 p.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Pogoditsky – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

14 ноября 2018 г.