

УДК 62

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ
ПЕРВОГО ВИДА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА**



RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE POWER SUPPLY OF THE FIRST TYPE ON THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE ELECTRIC DRIVE

Добробаба Юрий Петрович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Кубанский государственный технологический университет

Шкереда Эдуард Денисович

студент,
Кубанский государственный технологический университет

Ефремов Елисей Александрович

студент,
Кубанский государственный технологический университет

Аннотация. В настоящее время широко используются электроприводы с импульсными источниками питания. В таких электроприводах имеются фильтры, поэтому возможны колебательные переходные процессы. Разработан алгоритм формирования аперiodических переходных процессов в электроприводе с источниками питания первого вида.

Ключевые слова: параметры источника питания, динамические характеристики, якорная цепь, импульсные преобразователи, фильтр.

Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Associate Professor
of Department of Power Supply Industrial
Enter Prises,
Kuban State Technological University

Shkereda Eduard Denisovich

Student,
Kuban State Technological University

Efremov Elisey Alexandrovich

Student,
Kuban State Technological University

Annotation. Currently, electric drives with switching power supplies are widely used. These drives are equipped with filters, so oscillatory transients are possible. An algorithm for the formation of aperiodic transient processes in an electric drive with power supplies of the first type has been developed.

Keywords: power supply parameters, dynamic characteristics, anchor circuit, pulse converters, filter.

В работе [1] подробно исследованы динамические характеристики электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения. Такие исследования справедливы при плавном изменении напряжения, приложенного к якорной цепи двигателя. В настоящее время всё большее применение находят электроприводы с импульсным изменением напряжения, приложенного к якорной цепи двигателя. Так как импульсные преобразователи имеют фильтр, то необходимо учитывать влияние параметров источника питания на динамические характеристики электропривода.

В данной работе исследуется влияние параметров импульсного преобразователя первого вида (источник питания имеет внутреннее сопротивление и фильтр, состоящий из ёмкости и дросселя).

На рисунке 1 представлена расчётная схема электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения и источником питания первого вида.

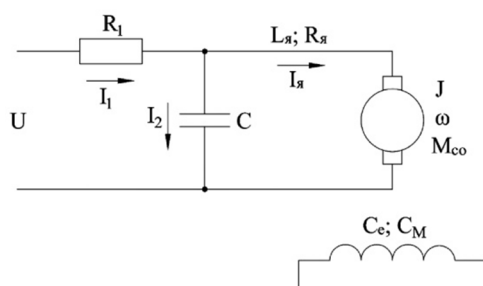


Рисунок 1

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: U – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В; I_1 – ток, протекающий через внутреннее сопротивление источника питания, А; I_2 – ток, протекающий через ёмкость фильтра источника питания, А; $I_{я}$ – ток якорной цепи электродвигателя, А; ω – угловая скорость исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $M_{со}$ – момент сопротивления электропривода, Н · м; R_1 – внутреннее сопротивление источника питания, Ом; C – ёмкость фильтра источника питания, Ф; $L_{я}$ – индуктивность якорной цепи электропривода (сумма индуктивностей дросселя и якоря двигателя), Гн; $R_{я}$ – сопротивление якорной цепи электропривода, Ом; J – момент инерции исполнительного органа электропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; C_e – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью исполнительного органа электродвигателя и его ЭДС, $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$; C_M – коэффициент пропорциональности между током якорной цепи электродвигателя и его моментом, В · с;

Математическая модель системы:

$$\begin{cases} U = R_1 I_1 + \frac{1}{C_p} \cdot I_2; \\ U = R_1 I_1 + C_e \omega + L_{я} p I_{я} + R_{я} I_{я}; \\ I_1 = I_2 + I_{я}; \\ C_M I_{я} = M_{со} + J p \omega. \end{cases}$$

После преобразования система представима в виде:

$$\frac{U}{C_e} = \left[\frac{L_{я} R_1 C_J}{C_e C_M} \cdot p^3 + \frac{L_{я} J}{C_e C_M} \cdot p^2 + \frac{R_{я} R_1 C_J}{C_e C_M} \cdot p^2 + \frac{R_{я} J}{C_e C_M} \cdot p + \frac{R_1 J}{C_e C_M} \cdot p + R_1 C_p + 1 \right] \cdot \omega + \frac{R_{я} + R_1}{C_e C_M} \cdot \left[\frac{L_{я} R_1 C}{R_{я} + R_1} \cdot p^2 + \frac{L_{я}}{R_{я} + R_1} \cdot p + \frac{R_{я} R_1 C}{R_{я} + R_1} \cdot p + 1 \right] \cdot M_{со}.$$

Целью работы является устранить возможность появления колебательных переходных процессов в электроприводе. Это достигается за счёт формирования апериодических переходных процессов в системе. При этом система должна иметь действительные отрицательные корни характеристического уравнения.

Рассмотрим вариант первый. Система имеет три кратных корня характеристического уравнения

$$(T p + 1)^3 = 0;$$

$$T^3 p^3 + 3T^2 p^2 + 3T p + 1 = 0.$$

При этом справедлива система из трех уравнений:

$$\begin{cases} \frac{L_{я} J}{C_e C_M} \cdot R_1 C = T^3; \\ \frac{L_{я} J}{C_e C_M} + \frac{R_{я} J}{C_e C_M} \cdot R_1 C = 3T^2; \\ \frac{R_{я} J}{C_e C_M} + \frac{R_1 J}{C_e C_M} + R_1 C = 3T. \end{cases}$$

Из системы следует уравнение

$$8T^3 - 3 \cdot \frac{(4R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \cdot T^2 + 6 \cdot \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \cdot \frac{R_{я} J}{C_e C_M} \cdot T - \frac{(R_{я} + R_1)^2 J^2}{C_e^2 C_M^2} \cdot \frac{R_{я} J}{C_e C_M} = 0.$$

Из этого уравнения определяется постоянная времени T , а затем определяются параметры:

$$R_1 C = 3T - \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M}.$$

$$\frac{L_{я} J}{C_e C_M} = 3T^2 - \frac{R_{я} J}{C_e C_M} \cdot \left[3T - \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \right].$$

В данной работе рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры: $C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$; $C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}$; $R_{я} = 5 \text{ Ом}$; $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $J = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

$$8T^3 - 4,8 \cdot T^2 + 1,2288 \cdot T - 0,131072 = 0;$$

$$T = 0,24652634 \text{ с}; R_1 C = 0,09957902 \text{ с}; \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} = 0,150460421 \text{ с}^2;$$

$$C = 0,019915804 \text{ Ф}; L_{я} = 2,350944078 \text{ Гн}.$$

Рассмотрим частный случай: отсутствуют ёмкость и дроссель в фильтре.

Дано: $C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$; $C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}$; $R_{я} = 5 \text{ Ом}$; $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $J = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $L_{я} = 0,1 \text{ Гн}$.

$$(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1) = 0;$$

$$T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2) \cdot p + 1 = 0.$$

При этом $T_1 = 0,629838667 \text{ с}$; $T_2 = 0,010161333 \text{ с}$.

Рассмотрим вариант второй. Система имеет два кратных корня характеристического уравнения

$$(T_1 p + 1)^2 \cdot (T_2 p + 1) = 0;$$

$$T_1^2 T_2 p^3 + (T_1^2 + 2T_1 T_2) \cdot p^2 + (2T_1 + T_2) \cdot p + 1 = 0.$$

При этом справедлива система из трех уравнений:

$$\begin{cases} \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot R_1 C = T_1^2 T_2; \\ \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} + \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot R_1 C = T_1^2 + 2T_1 T_2; \\ \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} + \frac{R_1 J}{C_e C_M} + R_1 C = 2T_1 + T_2. \end{cases}$$

Из третьего уравнения следует, что

$$R_1 C = 2T_1 + T_2 - \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M}.$$

После подстановки:

$$\begin{cases} \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot 2T_1 + \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot T_2 - \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} = T_1^2 T_2; \\ \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} + \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot 2T_1 + \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot T_2 - \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \cdot \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} = T_1^2 + 2T_1 T_2; \end{cases}$$

Из верхнего уравнения следует, что

$$T_2 = \frac{2T_1 - \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M}}{T_1^2 - \frac{L_{яJ}}{C_e C_M}} \cdot \frac{L_{яJ}}{C_e C_M}.$$

Из нижнего уравнения следует, что

$$\begin{aligned} \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} + \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot 2T_1 - \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \cdot \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} - T_1^2 &= \left[2T_1 - \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \right] \cdot \frac{2T_1 - \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M}}{T_1^2 - \frac{L_{яJ}}{C_e C_M}} \cdot \frac{L_{яJ}}{C_e C_M}; \\ \left[\frac{L_{яJ}}{C_e C_M} + \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot 2T_1 - \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \cdot \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} - T_1^2 \right] \cdot \left[T_1^2 - \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \right] &= \\ = \left[2T_1 - \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \right] \cdot \left[2T_1 - \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \right] \cdot \frac{L_{яJ}}{C_e C_M}; \\ \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot T_1^2 + 2 \cdot \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot T_1^3 - \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \cdot \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot T_1^2 - T_1^4 - \frac{L_{я}^2 J^2}{C_e^2 C_M^2} - & \\ - 2 \cdot \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot T_1 + \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \cdot \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} + \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot T_1^2 &= \\ = \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot 4T_1^2 - \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot 2T_1 - \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \cdot 2T_1 + \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \cdot \frac{R_{яJ}}{C_e C_M}; & \\ \frac{L_{я}^2 J^2}{C_e^2 C_M^2} - 2 \cdot \left[\frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} - T_1 \right] \cdot T_1 \cdot \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} + \left[T_1^2 - 2 \cdot \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot T_1 + \frac{(R_{я} + R_1)J}{C_e C_M} \cdot \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \right] \cdot T_1^2 &= 0. \end{aligned}$$

Задаваясь значением постоянной времени T_1 определяются параметры системы: индуктивность якорной цепи электропривода $L_{я}$; постоянная времени T_2 ; ёмкость фильтра источника питания C .

В работе выполнен численный эксперимент, результаты приведены в таблицах 1÷3.

Таблица 1

T_1, c	T_2, c	$L_{я}, ГН$	C, Φ
0,24652634	0,246526924	2,350943969	0,01991592
0,25	0,239527923	2,350234781	0,019905584
0,26	0,218746934	2,339834166	0,019749386
0,27	0,196813947	2,315610438	0,019362789
0,28	0,173333333	2,275	0,018666666
0,29	0,14762915	2,213805906	0,01752583
0,30	0,118361163	2,124080078	0,015672232
0,31	0,082	1,9859375	0,0124
0,32	0	1,6	0

Таблица 2

T_1, c	T_2, c	$L_{я}, ГН$	C, Φ
0,24	0,259411255	2,348528125	0,019882251
0,22	0,297134057	2,313376357	0,019426811
0,20	0,332820323	2,241025404	0,018564064
0,18	0,366996659	2,135622912	0,017399331
0,16	0,4	2	0,016
0,14	0,432060608	1,83621212	0,014412121
0,12	0,463343685	1,645820393	0,012668737
0,10	0,493972282	1,43005197	0,010794456
0,08	0,524040821	1,189897949	$8,8081642 \cdot 10^{-3}$
0,06	0,553623532	0,926176463	$6,7247064 \cdot 10^{-3}$
0,04	0,582779965	0,639575131	$4,555993 \cdot 10^{-3}$
0,02	0,611548567	0,330965615	$2,309713418 \cdot 10^{-3}$
0,01	0,625819295	0,168034554	$1,163859 \cdot 10^{-3}$
0,005	0,632919372	0,084687413	$5,83875 \cdot 10^{-4}$
0,0025	0,636462086	0,042510824	$2,924172 \cdot 10^{-4}$

Таблица 3

T_1, c	T_2, c	$L_{я}, ГН$	C, Φ
0,16	∞	0,4	∞
0,14	2,807938802	0,35128789	0,48958776
0,12	1,536656277	0,304179609	0,227331255
0,10	1,119361042	0,257448031	0,135872208
0,08	0,915959135	0,210102062	0,087191827
0,06	0,79837644	0,161323546	0,055675288
0,04	0,723886689	0,110424875	0,032777337
0,02	0,67457583	0,056534385	0,014915167
0,01	0,655514038	0,028840445	$7,1028076 \cdot 10^{-3}$
0,005	0,647403207	0,014531337	$3,480641569 \cdot 10^{-3}$
0,0025	0,643617278	$7,293863016 \cdot 10^{-3}$	$1,723455725 \cdot 10^{-3}$

На рисунке 2 представлены три кривые: № 1 на основе таблицы 1, № 2 на основе таблицы 2, № 3 на основе таблицы 3. Система имеет действительные корни при условии, что параметры системы находятся левее кривой № 1 и ниже кривой № 2. Кроме того система имеет действительные корни при условии, что параметры системы находятся левее кривой № 3.

Рассмотрим вариант третий. Система имеет три разных действительных корня

$$(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1) \cdot (T_3 p + 1) = 0;$$

$$T_1 T_2 T_3 p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) \cdot p^2 + (T_1 + T_2 + T_3) \cdot p + 1 = 0.$$

При этом справедлива система из трех уравнений:

$$\begin{cases} \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot R_1 C = T_1 T_2 T_3; \\ \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} + \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot R_1 C = T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3; \\ \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} + \frac{R_1 J}{C_e C_M} + R_1 C = T_1 + T_2 + T_3. \end{cases}$$

Из третьего уравнения следует, что

$$T_2 + T_3 = \frac{(R_{я}+R_1)J}{C_e C_M} + R_1 C - T_1.$$

После подстановки во второе уравнение

$$\begin{aligned} \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} + \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot R_1 C &= \left[\frac{(R_{я}+R_1)J}{C_e C_M} + R_1 C \right] \cdot T_1 - T_1^2 + T_2 T_3; \\ T_2 T_3 &= T_1^2 - \left[\frac{(R_{я}+R_1)J}{C_e C_M} + R_1 C \right] \cdot T_1 + \left[\frac{L_{яJ}}{C_e C_M} + \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot R_1 C \right]. \end{aligned}$$

Таким образом, для постоянной времени T_1 справедливо уравнение

$$T_1^3 - \left[\frac{(R_{я}+R_1)J}{C_e C_M} + R_1 C \right] \cdot T_1^2 + \left[\frac{L_{яJ}}{C_e C_M} + \frac{R_{яJ}}{C_e C_M} \cdot R_1 C \right] \cdot T_1 - \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} \cdot R_1 C = 0.$$

Рассмотрим точку А на рисунке 2, имеющую следующие координаты $L_{я} = 1,0$ Гн; $C = 0,005$ Ф. При этом система имеет следующие параметры:

$$T_1 = 0,536312621 \text{ с}; T_2 = 0,098355096 \text{ с}; T_3 = 0,030332283 \text{ с}.$$

Рассмотрим точку В на рисунке 2, имеющую следующие координаты $L_{я} = 0,1$ Гн; $C = 0,05$ Ф. При этом система имеет следующие параметры:

$$T_1 = 0,083288244 \text{ с}; T_2 = 0,78215077 \text{ с}; T_3 = 0,024560986 \text{ с}.$$

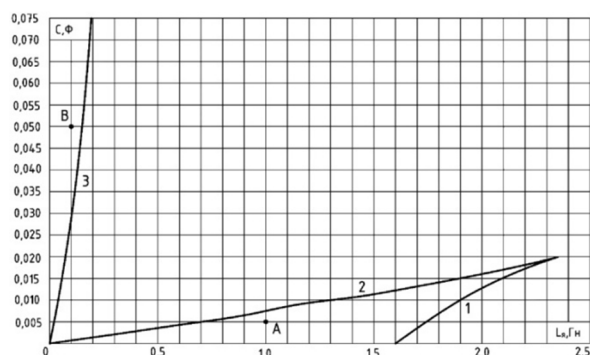


Рисунок 2

Таким образом, определены две области параметров электропривода с импульсным источником питания первого вида, при которых переходные процессы имеют апериодический вид.

Литература

1. Дობробаба Ю.П. Электрический привод: учеб. пособие. 2-е изд., доп. / Кубан. гос. технол. ун-т. – Краснодар : Изд. ФГБОУ ВПО «КубГТУ», 2013. – 302 с.

References

1. Dobrobaba Y.P. Electric drive: study guide, 2nd ed., Add. / Kuban State Technological University. – Krasnodar : Publishing house of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «KubSTU», 2013. – 302 p.