

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Д.И. Родькин¹, А.А. Хараджян¹, С.А. Семериков²

¹ г. Кривой Рог, Криворожский технический университет

² г. Кривой Рог, Криворожский государственный педагогический университет

Определение реальных параметров электрических двигателей и электромеханических систем электрического привода необходимо для определения потерь, для расчета, настройки и коррекции систем автоматического управления электроприводами в процессе эксплуатации. Такими параметрами для двигателей являются активное сопротивление обмоток, индуктивность, момент инерции ротора, момент сопротивления холостого хода, а для систем привода – это момент сопротивления нагрузки, момент инерции вращающихся элементов, скорость вращения. Некоторые из этих параметров не зависят от состояния электродвигателя (момент сопротивления и момент инерции нагрузки), но другие – являются параметрами самого двигателя и сильно зависят от условий его эксплуатации. Так, например, поток двигателя находится в сильной зависимости от качества стали магнитопровода, активное сопротивление – от температурных условий и т.д. Кроме того, параметры электродвигателя могут изменяться в процессе эксплуатации, при аварийных режимах и после ремонта двигателей.

Достоинством предлагаемой системы определения параметров привода является возможность отказ от неудобных механических датчиков скорости, которые вносят большие погрешности в системы управления.

1. Энергетическая модель двигателя постоянного тока.

Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением является в настоящее время основным типом двигателя, используемым в автоматизированном электроприводе при наиболее высоких требованиях к статическим и динамическим показателям.

Двигатель постоянного тока в общем случае описывается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 u_{я} &= R_{я\Sigma} \cdot i_{я} + L_{я\Sigma} \frac{di_{я}}{dt} + e \\
 u_{в} &= R_{в\Sigma} \cdot i_{в} + L_{в\Sigma} \frac{di_{в}}{dt} \\
 M_{\partial} - M_{с} &= J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \\
 k\Phi &= f(i_{в}) \\
 e &= k\Phi \cdot \omega \\
 M_{\partial} &= k\Phi \cdot i_{я}
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $u_{я}$ – напряжение питания якорной цепи; $i_{я}$ – ток якорной цепи; $R_{я\Sigma}$ – суммарное сопротивление якорной цепи; $L_{я\Sigma}$ – суммарная индуктивность якорной цепи; e – противо-ЭДС двигателя; $u_{в}$ – напряжение питания цепи возбуждения; $i_{в}$ – ток цепи возбуждения; $R_{в\Sigma}$ – суммарное сопротивление цепи возбуждения; $L_{в\Sigma}$ – суммарная индуктивность цепи возбуждения; ω – скорость вращения ротора; J_{Σ} – суммарный момент инерции ротора; M_{∂} – момент двигателя; $M_{с}$ – момент статического сопротивления; $k\Phi$ – коэффициент потока машины.

Наиболее легкоуправляемым и распространенным является ДПТ с независимым возбуждением. ДПТ НВ имеет следующую схему включения обмоток (рис.1.).

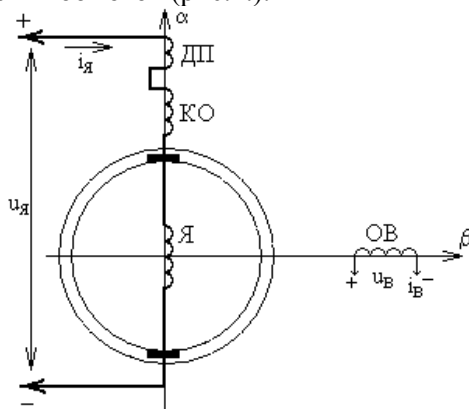


Рис. 1. Схема включения обмоток двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Необходимо отметить, что приведенная выше система уравнений (1) справедлива для компенсированных двигателей и к двигателям, не имеющим компенсационной обмотки, может быть отнесено с некоторым приближением. Для них действие продольной составляющей поперечной реакции якоря приводит при постоянном токе возбуждения к уменьшению потока двигателя по мере роста тока якоря в нелинейной зависимости, что вызывает возрастание статической жесткости механических характеристик.

2. Математическое описание контура энергодиагностики.

Контур энергодиагностики представляет собой систему уравнений, с помощью которых возможно определение энергетических показателей машины и на их основе определение параметров системы привода.

Для ДПТ, как и для любой машины справедлив закон сохранения энергии. Электрическая энергия в ДПТ преобразуется в механическую за вычетом потерь или, наоборот, из механической в электрическую в зависимости от режима работы системы привода. Это преобразование энергии может быть описано следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_c(t) &= I_{\text{я}}(t)^2 \cdot R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{dI_{\text{я}}(t)}{dt} \cdot I_{\text{я}}(t) + \omega(t) \cdot k\Phi \cdot I_{\text{я}}(t) \\ P_{\text{эм}}(t) &= M_{\text{хх}}(t) \cdot \omega(t) + M_c(t) \cdot \omega(t) + \frac{d}{dt} \left(\frac{J_{\Sigma}(t) \cdot \omega(t)^2}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $P_{\text{эм}}(t) = \omega(t) \cdot k\Phi \cdot I_{\text{я}}(t)$ – электромагнитная мощность в зазоре машины; $M_{\text{хх}}$ – момент холостого хода.

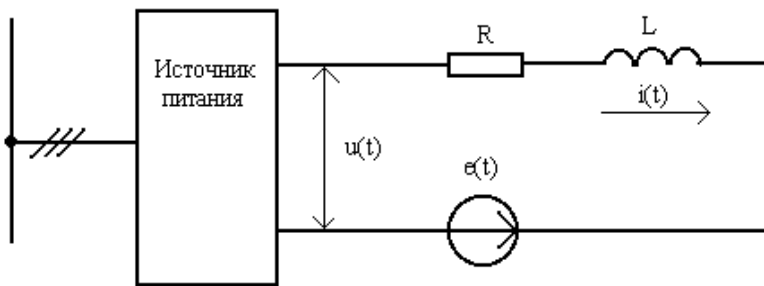


Рис.2. Схема замещения МПТ.

Машину постоянного тока можно представить электрической схемой замещения, состоящей из трех элементов: активного и индуктивного сопротивлений, и механической части, замененной эквивалентной ЭДС, рис.2.

Для схемы замещения справедливо следующее уравнение электрического равновесия:

$$U_c(t) = I_{я}(t) \cdot R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma} \frac{dI_{я}(t)}{dt} + \omega(t) \cdot k\Phi \quad (3)$$

Если уравнение (3) умножить на ток $I(t)$, то получим уравнение баланса мощности:

$$P_c(t) = I_{я}(t)^2 \cdot R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma} \frac{dI_{я}(t)}{dt} \cdot I_{я}(t) + \omega(t) \cdot k\Phi \cdot I_{я}(t) \quad (4)$$

где $P_{эм}(t) = \omega(t) \cdot k\Phi \cdot I_{я}(t)$ – электромагнитная мощность в зазоре машины.

С другой стороны электромагнитная мощность может быть представлена через электромагнитный момент двигателя $M_{эм}(t) = k\Phi \cdot I_{я}(t)$:

$$P_{эм}(t) = M_{эм}(t) \cdot \omega(t) = k\Phi \cdot I_{я}(t) \cdot \omega(t) \quad (5)$$

Из уравнения механического равновесия имеем:

$$P_{эм}(t) = M_{с\Sigma}(t) \cdot \omega(t) + \frac{d}{dt} \left(\frac{J_{\Sigma}(t) \cdot \omega(t)^2}{2} \right) \quad (6)$$

Подставив в выражение (4) выражение (5) с учетом (6) получим:

$$P_c(t) = I_{я}(t)^2 \cdot R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma} \frac{dI_{я}(t)}{dt} \cdot I_{я}(t) + M_{с\Sigma}(t) \cdot \omega(t) + \frac{d}{dt} \left(\frac{J_{\Sigma}(t) \cdot \omega(t)^2}{2} \right)$$

где $M_{с\Sigma}(t) \cdot \omega(t)$ – механическая мощность на валу.

Полученные уравнения энергетического баланса привода можно использовать в качестве исходных для энергодиагностики и определения реальных параметров схемы замещения.

3. Определение параметров ЭП.

Так как двигатель представляет электромеханическую систему, то наиболее рационально разделить определение электрических и механических параметров.

Период дискретности определяется схемой тиристорного

преобразователя и находится по формуле:
$$T_d = \frac{1}{m \cdot f_c}$$

где f_c – частота питающей сети; m – число условных фаз.

Исходными данными для определения электрических параметров являются кривые тока и напряжения якорной цепи машины.

Определение параметров производится на основе уравнения баланса мощности:

$$P_c(t) = I_{я}(t)^2 \cdot R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma} \frac{dI_{я}(t)}{dt} \cdot I_{я}(t) + \omega(t) \cdot k_{\Phi} \cdot I_{я}(t)$$

В этом уравнении можно обозначить противо-ЭДС якоря:
$$E(t) = \omega(t) \cdot k_{\Phi} \quad (7)$$

Тогда уравнение можно записать в таком виде:

$$P_c(t) = I_{я}(t)^2 \cdot R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma} \frac{dI_{я}(t)}{dt} \cdot I_{я}(t) + E(t) \cdot I_{я}(t) \quad (8)$$

Хотя параметры $R_{я\Sigma}$ и $L_{я\Sigma}$ не показаны в функции времени, но они также изменяются во времени. Однако изменение этих параметров во времени происходит достаточно медленно и на интервалах времени соизмеримыми с интервалом дискретности их можно считать постоянными величинами.

Противо-ЭДС ротора аппроксимируется степенным полиномом. Для аппроксимации используются полиномы степенью не выше 10 и не ниже 3.

$$E(t) = e_0 + \sum_{i=1}^n e_i \cdot t^i \quad (9)$$

Подставив в уравнение (8) уравнение (9) получим:

$$P_c(t) = I_{я}(t)^2 \cdot R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma} \frac{dI_{я}(t)}{dt} \cdot I_{я}(t) + e_0 \cdot I_{я}(t) + \sum_{i=1}^n e_i \cdot t^i \cdot I_{я}(t) \quad (10)$$

Измерения тока и напряжения производятся в m точках одного интервала дискретности.

На основе этих измерений можно составить систему уравнений, решение которой даст значения $R_{я\Sigma}$ и $L_{я\Sigma}$, а также коэффициенты полинома противо-ЭДС e_0, e_1, \dots, e_n .

Определение механических параметров машины представляет большие сложности, чем определение электрических параметров.

Механическими параметрами, которые подлежат определению, являются момент инерции ротора, момент сопротивления и электромеханический параметр – коэффициент потока машины. Их определение возможно из уравнения баланса мощности в механической части системы привода:

$$P_{эм}(t) = M_{с\Sigma}(t) \cdot \omega(t) + \frac{d}{dt} \left(\frac{J_{\Sigma}(t) \cdot \omega(t)^2}{2} \right)$$

Данное уравнение описывает наиболее общий случай, когда изменяются все параметры привода. С учетом достаточной малости периода дискретности и инерционности изменения параметров изменением этих параметров на интервале дискретности можно пренебречь.

Момент инерции на интервале дискретности принимается постоянным. Тогда уравнение примет вид:

$$P_{эм}(t) = M_{с\Sigma}(t) \cdot \omega(t) + J_{\Sigma} \frac{d\omega(t)}{dt} \omega(t) \quad (11)$$

Подставим в уравнение (11) выражение (7). Получим:

$$P_{эм}(t) = M_{с\Sigma}(t) \cdot \frac{E(t)}{k_{\Phi}} + \frac{J_{\Sigma}}{k_{\Phi}^2} \frac{dE(t)}{dt} E(t) \quad (12)$$

В уравнении (12) известны электромагнитная мощность и против-ЭДС. Тогда разделив уравнение (12) на $E(t)$ получим:

$$\frac{P_{эм}(t)}{E(t)} = \frac{M_{с\Sigma}(t)}{k_{\Phi}} + \frac{J_{\Sigma}}{k_{\Phi}^2} \frac{dE(t)}{dt} \quad (13)$$

Однако данное уравнение не может дать однозначных решений для неизвестных величин, поэтому необходимо еще одно уравнение для определения их взаимосвязи:

$$P_{эм}(t) - M_{с\Sigma}(t) \cdot \omega(t) = J_{\Sigma} \frac{d\omega(t)}{dt} \omega(t) \quad (14)$$

$$P_{эм}(t) - M_{с\Sigma}(t) \cdot \frac{E(t)}{k_{\Phi}} = \frac{J_{\Sigma}}{k_{\Phi}^2} \frac{dE(t)}{dt} E(t) \quad (15)$$

Аналогично уравнение (15) разделим на $J_{\Sigma} E(t) / k_{\Phi}^2$.

$$\frac{P_{эм}(t) k_{\Phi}^2}{E(t) J_{\Sigma}} - M_{с\Sigma}(t) \cdot \frac{k_{\Phi}}{J_{\Sigma}} = \frac{dE(t)}{dt} \quad (16)$$

Из уравнений (13) и (16) можно построить две системы уравнений, из которых находятся соотношения неизвестных ве-

личин. Обозначим эти соотношения следующим образом:

$$a_1 = \frac{M_{cm}}{k_\Phi} \qquad a_2 = \frac{J_\Sigma}{k_\Phi^2} \qquad (17 - 18)$$

$$a_3 = \frac{M_{cm} \cdot k_\Phi}{J_\Sigma} \qquad a_4 = \frac{k_\Phi^2}{J_\Sigma} \qquad (19 - 20)$$

Из предварительной информации о системе привода известен диапазон изменения момента инерции привода J_{\min} и J_{\max} . Если предположить, что момент инерции известен, тогда можно однозначно определить момент сопротивления и коэффициент потока машины из выражений (17, 20).

$$k_\Phi = \sqrt{a_4 \cdot J_\Sigma} \qquad (21)$$

$$M_{cm} = a_1 \cdot k_\Phi \qquad (22)$$

Но так как значение момента инерции достоверно неизвестно, то для оценки ошибки определения момента инерции, момента сопротивления и потока необходимо сделать подстановку полученных значений в уравнение движения привода (12):

$$P_{ЭМ\ расчет}(t) = M_{c\Sigma} \cdot \frac{E(t)}{k_\Phi} + \frac{J_\Sigma}{k_\Phi^2} \frac{dE(t)}{dt} E(t)$$

Дальше необходимо определить разность между истинным значением электромагнитной мощности и её расчетным значением $\varepsilon_P = P_{ЭМ} - P_{ЭМ\ расчет}$ и в соответствии со значением ошибки скорректировать значение момента инерции.

Для поиска значений момента инерции, момента сопротивления и потока можно применить один из известных методов поиска экстремума функции нескольких переменных: метод координатного спуска, метод градиента или симплексный поиск.

Литература:

1. Бабак В.П., Хандецкий В.С., Е. Шрюфер. Обробка сигналів: Підручник. – К.: Либідь, 1996.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами/ Под ред. О.В. Слежановского. – М.: Энергоатомиздат, 1986.