

О МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ЭНЕРГОДИАГНОСТИКЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Д.И. Родькин, А.А. Хараджян, С.Л. Михайлов

Украина, Криворожский технический университет

Е.В. Чернов, С.А. Семериков

Украина, Криворожский государственный пединститут

Рассмотрены методы построения компьютерных моделей динамических систем электропривода постоянного тока (ЭППТ). Предложен метод определения реальных параметров электромеханических систем ЭППТ в условиях ограничения экспериментальной информации. Построена модель системы привода для случая неизменного момента инерции; проведены расчёты и сравнение с другими моделями.

1. Введение

При моделировании динамических систем возможно несколько подходов к решению задачи идентификации, основными компонентами которых являются:

- использование известных из литературы математических моделей;
- статистическая обработка экспериментальной информации;
- использование методов восстановления зависимостей в условиях ограниченного знания об объекте исследования.

При восстановлении зависимостей данные можно аппроксимировать простой функцией, применимой во всем диапазоне табличных значений, но не обязательно проходящей через все точки. Обычно аппроксимирующую функцию выбирают в виде линейной комбинации подходящих функций, например - в виде полинома, достаточно хорошо передающего общий ход зависимости $F(x_0, x_1, \dots) = 0$. Условием минимальности отклонения от истинной зависимости является равенство нулю частных производных функции F по переменным x_i , что приводит к необходимости решения СЛАУ.

Необходимым условием эффективности решения задачи моделирования является наличие комплекса оптимизированных алгоритмов векторных, матричных и полиномиальных вычислений. Наличие компьютера позволяет интенсифицировать процесс вычислений, а современные языки программирования - представить его классически, в виде операций над элементами соответствующих алгебр. Основными объектами линейной алгебры являются вектора и матрицы, которые средствами языка C++ достаточно легко превратить в соответствующие классы, сохранив при этом естественное представление матрицы как упорядоченного кортежа арифметических векторов, а вектора - как упорядоченного кортежа объектов любой природы.

В созданной нами библиотеке основное внимание уделено арифметическим векторам, и именно они положены в основу соответствующих матричных классов, в которых реализованы основные операции линейной алгебры (сложения, умножения, транспонирования, обращения, вычисления детерминантов, собственных векторов и собственных значений) и

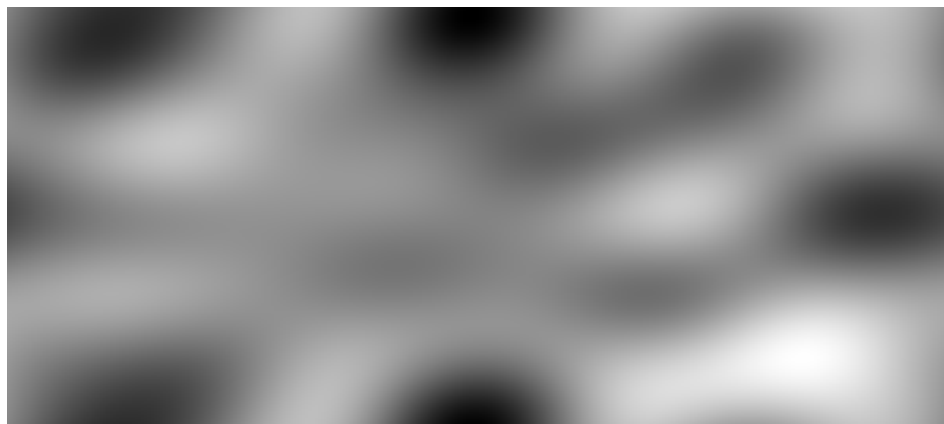
нахождения решения СЛАУ как в действительной, та и в комплексной формах. Это даёт возможность значительно упростить часто громоздкую вычислительную часть модели.

Использование библиотеки не только значительно уменьшает объём программ, но и во многих случаях и время вычислений благодаря оптимизированным по скорости алгоритмам, что имеет не последнее значение при большом парке устаревших компьютеров. Она позволяет манипулировать любыми числовыми объектами произвольной точности, накладывая единственное ограничение - общий объём одновременно существующих в программе векторно-матричных объектов не должен превышать объёма свободного места на резидентном диске.

Если, к примеру, Вы решаете секулярное уравнение, имея при этом входным параметром действительный гамильтониан размером 1000x1000 чисел 10-байтовой точности, то на выходе получаем матрицу волновых функций той же размерности и энергетический вектор, что в простейшем случае требует 19,09 Мб памяти и около 85 минут для вычисления. Наши исследования показали, что идентичные результаты можно получить при объёме памяти в 2,5 раза меньше и всего за 50 минут на системе 386SX-40 с 4Mb RAM путём неполной диагонализации матрицы из чисел 4-байтовой точности с последующим уточнением полученных значений модифицированным методом Виландта.

Схема организации виртуальной памяти на резидентном диске, используемая нами, менее эффективна используемой оболочкой Windows 3.1 с расширением Win32s, поэтому при работе программ в flat-модели памяти её желательно отключать. Отметим, что использование безсегментной модели памяти и переход к 32-разрядному программированию на 15-20% ускоряет счёт, что позволяет рассматривать 32-разрядные операционные системы как желаемую среду для громоздких вычислений.

Механизмы библиотеки позволяют представить матричные данные в визуальной форме как в полноцветном варианте (16 млн. цветов), так и в градациях серого, что позволяет, например, матрицу электронной плотности представить в виде понятного и удобного для печати рисунка. Другие её возможности - методы регрессионного анализа и статистической обработки экспериментальных данных - позволили использовать библиотеку для такой области, как управление измерительным оборудованием (изотопная лаборатория Криворожского металлургического комбината «Криворожсталь»).



2. Сбор данных об объекте

Для систем оперативного управления характерно непрерывное изменение параметров объекта, связанное как с его функционированием, так и с внешними воздействиями. В связи с этим актуальным является построение динамической математической модели «плывущих» параметров. Для этого необходим сбор экспериментальной информации, предполагающий наличие программно-аппаратного комплекса, аппаратная часть которого состоит из

- ◆ устройства измерения входных величин и генерации управляющих сигналов;
- ◆ микропроцессорного устройства.

Устройство измерения входных величин и генерации управляющих сигналов выполняет функции преобразования входных величин, т.е. ток, напряжение, частота вращения, температура и т.д. преобразуются в соответствующие пропорциональные напряжения, которые гальванически развязаны с источником сигнала и преобразованы в уровни, необходимые для работы АЦП. Входы, которые предназначены для измерения частоты, периода и сдвига фаз, имеют преобразование по уровню и гальваническую развязку входа от счетчика.

Микропроцессорное устройство выполняет функции:

- ◆ первичной обработки информации с датчиков;
- ◆ связи с персональной ЭВМ;
- ◆ управления устройством измерения входных величин.

В персональный компьютер на стадии проектирования заложены огромные вычислительные возможности, которые можно использовать для обработки информации в реальном масштабе времени.

Использование ЭВМ только для обработки данных, полученных экспериментально и введенных в ЭВМ в виде файла, неоправданно усложняет этот процесс и ставит достоверность полученных результатов в зависимость от "человеческого фактора", т.е. возможных ошибок при вводе данных и т.п. В современных экспериментах и производственной практике объемы информации настолько велики, что ручной ввод данных крайне затруднителен.

Эти трудности можно обойти, возложив функции сбора данных на ЭВМ. При этом появляется возможность выполнять оперативную обработку данных и в зависимости от полученных результатов оперативно корректировать ход эксперимента или технологического процесса. Человек в этом случае становится только наблюдателем.

При таком способе обработки данных компьютер по определенному алгоритму производит считывание информации с датчиков и, в случае необходимости, корректирует её. Точность измерений в такой системе резко возрастает. С помощью специальных аппаратно-программных решений можно повысить не только точность, но и разрешающую способность цифровой системы.

При сопряжении объекта измерения с компьютером необходимо обеспечить

- гальваническую развязку объекта и компьютера,
- согласование уровней входных сигналов,
- преобразование измеряемого параметра сигнала в напряжение или ток,
- требуемую точность преобразования входного параметра.

Выполнение этих условий обычно достигается применением стандартных плат АЦП и ЦАП.

3. Диагностика параметров объекта

Определение реальных параметров электрических двигателей и электромеханических систем электрического привода необходимо для определения потерь и для расчета и настройки 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.

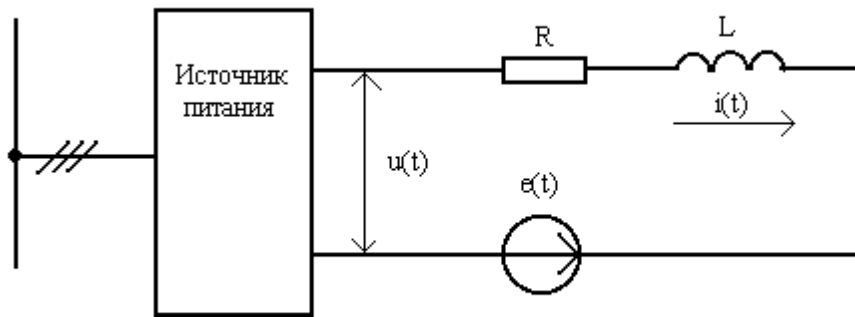


Рис.1. Схема замещения МПТ.

Машину постоянного тока можно представить состоящей из трех элементов: активно- и индуктивного сопротивлений и механической части, заменённой эквивалентной ЭДС (рис1).

Для схемы замещения справедливо следующее уравнение электрического равновесия:

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (1)$$

Если уравнение (1) умножить на ток $i(t)$, то получим уравнение баланса мощности:

$$u(t) \cdot i(t) = R \cdot i(t)^2 + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \cdot i(t) + e(t) \cdot i(t) \quad (2)$$

где $u(t) \cdot i(t) = P_c$ - мощность, подводимая из сети;

$R \cdot i(t)^2 = P_R$ - мощность, рассеиваемая на активных сопротивлениях;

$L \cdot \frac{di(t)}{dt} \cdot i(t) = P_L$ - мощность, запасаемая в индуктивностях;

$e(t) \cdot i(t) = P_{\text{мех}}$ - механическая мощность.

Механическая мощность может быть выражена следующим образом:

$$P_{\text{мех}} = M_{\text{дв}}(t) \cdot \omega(t) = k\Phi \cdot i(t) \cdot \omega(t) = e(t) \cdot i(t) \quad (3)$$

Из уравнения механического равновесия имеем:

$$M_{\text{д}}(t) \cdot \omega(t) = M_{\text{с}}(t) \cdot \omega(t) + J \cdot \omega(t) \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (4)$$

Подставив в выражение (2) выражение (4) с учетом (3) получим:

$$u(t) \cdot i(t) = R \cdot i(t)^2 + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \cdot i(t) + M_{\text{с}}(t) \cdot \omega(t) + J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \cdot \omega(t)$$

где

$M_{\text{с}}(t) \cdot \omega(t)$ - механическая мощность на валу;

$J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \cdot \omega(t)$ - динамическая составляющая мощности якоря двигателя.

Мгновенная мощность источника питания равна сумме мгновенных мощностей составляющих схемы замещения реальной электрической машины системы привода.

Известно, что ток якоря любой формы можно разложить в ряд Фурье:

$$i(t) = i_0 + i_{1\text{с}} \cdot \sin(\Omega \cdot t) + i_{1\text{с}} \cdot \sin(\Omega \cdot t) + \dots + i_{\text{нс}} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t) + i_{\text{нс}} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t)$$

Так, например, для первой гармоники получим:

$$i(t) = i_0 + i_1 \cdot \sin(\Omega \cdot t) \quad (5)$$

Непосредственное измерение некоторых параметров электромеханической системы невозможно: потока двигателя, электромагнитного момента. Для их определения используют косвенные методы.

В качестве перспективного метода измерения параметров системы можно предложить определение параметров из уравнений энергетического баланса. При этом считается, что известными параметрами являются зависимости потребляемого тока и питающего напряжения от времени. Параметры привода определяют по экспериментальным данным, выбирая подходящие аппроксимирующие полиномы и решая систему уравнений энергетического баланса.

Наиболее универсальным методом аппроксимации является аппроксимация рядами Фурье, что позволяет аппроксимировать как периодические, так и непериодические сигналы. Существует несколько методов построения ряда Фурье по выборкам сигнала через равные промежутки времени. Например, коэффициенты ряда могут быть вычислены по следующим формулам:

$$a_0 = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} y_n \cdot \cos(\Omega \cdot t_n)$$

$$a_n = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} y_n \cdot \cos(k \cdot \Omega \cdot t_n) \quad , k = 0, 1, \dots, K$$

$$b_n = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} y_n \cdot \cos(k \cdot \Omega \cdot t_n) \quad , k = 1, \dots, K$$

где K - число гармоник;

N - число выборок сигнала.

Другой метод предполагает вычисление коэффициентов ряда с помощью построения системы уравнений вида:

$$\begin{cases} y(t_0) = a_0 + b_1 \cdot \sin(\Omega \cdot t_0) + a_1 \cdot \cos(\Omega \cdot t_0) + \dots + b_n \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_0) + a_n \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_0) \\ y(t_1) = a_0 + b_1 \cdot \sin(\Omega \cdot t_1) + a_1 \cdot \cos(\Omega \cdot t_1) + \dots + b_n \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_1) + a_n \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_1) \\ \dots \dots \\ y(t_n) = a_0 + b_1 \cdot \sin(\Omega \cdot t_n) + a_1 \cdot \cos(\Omega \cdot t_n) + \dots + b_n \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_n) + a_n \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_n) \end{cases}$$

Но при таком определении коэффициентов число выборок сигнала должно быть $n=2N+1$, где N - число гармоник.

Для большей универсальности разложим заданные ток и напряжение в ряды:

$$u(t) = u_0 + u_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t) + u_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t) + \dots + u_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t) + u_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t)$$

$$i(t) = i_0 + i_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t) + i_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t) + \dots + i_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t) + i_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t)$$

где $u_0, u_{1s}, u_{1c}, \dots, u_{ns}, u_{nc}$ - коэффициенты разложения напряжения,

$i_0, i_{1s}, i_{1c}, \dots, i_{ns}, i_{nc}$ - коэффициенты разложения тока.

Эти коэффициенты определяются следующим образом: производится n выборок значений тока и напряжения через одинаковые интервалы времени и решаются системы уравнений для тока и напряжения (рис. 2).

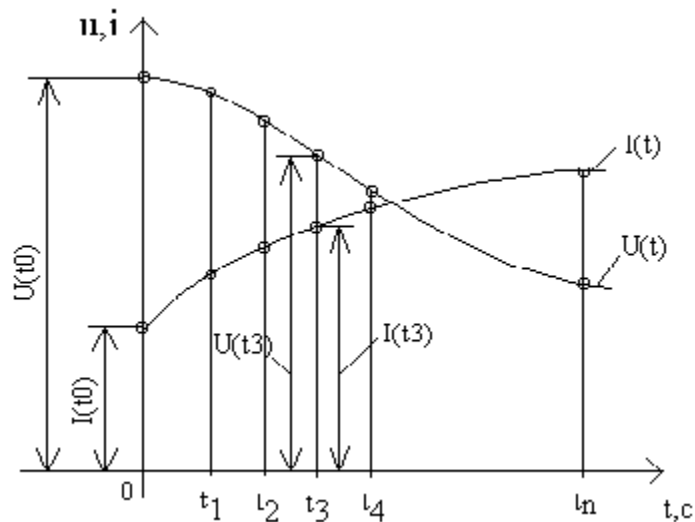


Рис.2. Аппроксимация кривых тока и напряжения.

$$\begin{cases} u(t_0) = u_0 + u_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t_0) + u_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t_0) + \dots + u_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_0) + u_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_0) \\ u(t_1) = u_0 + u_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t_1) + u_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t_1) + \dots + u_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_1) + u_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_1) \\ \dots \dots \\ u(t_n) = u_0 + u_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t_n) + u_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t_n) + \dots + u_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_n) + u_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_n) \\ i(t_0) = i_0 + i_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t_0) + i_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t_0) + \dots + i_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_0) + i_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_0) \\ i(t_1) = i_0 + i_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t_1) + i_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t_1) + \dots + i_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_1) + i_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_1) \\ \dots \dots \\ i(t_n) = i_0 + i_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t_n) + i_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t_n) + \dots + i_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_n) + i_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_n) \end{cases}$$

Из уравнения энергетического баланса в электрической цепи:

$$u(t) \cdot i(t) = R \cdot i(t)^2 + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \cdot i(t) + e(t) \cdot i(t)$$

определяем $R, L, e(t)$. Противоположно-ЭДС $e(t)$ также представим в виде ряда Фурье:

$$e(t) = e_0 + e_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t) + e_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t) + \dots + e_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t) + e_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t).$$

Система уравнений энергетического баланса в электрической цепи имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t_0) \cdot i(t_0) = R \cdot i(t_0)^2 + L \frac{di(t_0)}{dt} \cdot i(t_0) + (e_0 + e_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t_0) + e_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t_0) + \dots + \\ + e_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_0) + e_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_0)) \cdot i(t_0) \\ u(t_1) \cdot i(t_1) = R \cdot i(t_1)^2 + L \frac{di(t_1)}{dt} \cdot i(t_1) + (e_0 + e_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t_1) + e_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t_1) + \dots + \\ + e_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_1) + e_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_1)) \cdot i(t_1) \\ \dots \dots \\ u(t_n) \cdot i(t_n) = R \cdot i(t_n)^2 + L \frac{di(t_n)}{dt} \cdot i(t_n) + (e_0 + e_s \cdot \sin(\Omega \cdot t_n) + e_c \cdot \cos(\Omega \cdot t_n) + \dots + \\ + e_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_n) + e_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_n)) \cdot i(t_n) \end{array} \right.$$

Для определения $k\Phi, J$ и $M_c(t)$ воспользуемся уравнением баланса мощности механической системы:

$$e(t) \cdot i(t) = M_c(t) \cdot \omega(t) + J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \cdot \omega(t) \quad (6)$$

Для построенной на основе (6) системы уравнений определитель оказывается равным нулю, что соответствует бесконечному числу решений. Это объясняется тем, что число переменных, связанных нелинейной зависимостью, всегда превышает число уравнений. Поэтому для нахождения взаимосвязи параметров преобразуем выражение (6); учитывая, что $e(t) = k\Phi \cdot \omega(t)$, после ряда преобразований получим:

$$\begin{aligned} P_{ЭМ}(t) &= \frac{M_c(t) \cdot e(t)}{k\Phi} + \frac{J}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{de(t)}{dt} \cdot e(t) \\ \frac{P_{ЭМ}(t)}{e(t)} &= \frac{M_c(t)}{k\Phi} + \frac{J}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_{ЭМ}(t) - M_c(t) \cdot \omega(t) &= J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \cdot \omega(t) \\ P_{ЭМ}(t) - \frac{M_c(t) \cdot e(t)}{k\Phi} &= \frac{J}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{de(t)}{dt} \cdot e(t) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{P_{ЭМ}(t)}{e(t)} \cdot \frac{(k\Phi)^2}{J} - \frac{M_c(t) \cdot k\Phi}{J} = \frac{de(t)}{dt}$$

Статический момент сопротивления также будем искать в виде ряда Фурье:

$$M_c(t) = M_0 + M_{1s} \cdot \sin(\Omega \cdot t) + M_{1c} \cdot \cos(\Omega \cdot t) + \dots + M_{ns} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t) + M_{nc} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t)$$

Из (7), (8) составляем системы:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{P_{\text{ЭМ}}(t_0)}{e(t_0)} = \frac{M_0}{k\Phi} + \frac{M_{1s}}{k\Phi} \cdot \sin(\Omega \cdot t_0) + \frac{M_{1c}}{k\Phi} \cdot \cos(\Omega \cdot t_0) + \dots + \\
\quad + \frac{M_{ns}}{k\Phi} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_0) + \frac{M_{nc}}{k\Phi} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_0) + \frac{J}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{de(t_0)}{dt}; \\
\frac{P_{\text{ЭМ}}(t_1)}{e(t_1)} = \frac{M_0}{k\Phi} + \frac{M_{1s}}{k\Phi} \cdot \sin(\Omega \cdot t_1) + \frac{M_{1c}}{k\Phi} \cdot \cos(\Omega \cdot t_1) + \dots + \\
\quad + \frac{M_{ns}}{k\Phi} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_1) + \frac{M_{nc}}{k\Phi} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_1) + \frac{J}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{de(t_1)}{dt}; \\
\quad \dots \quad \dots \\
\frac{P_{\text{ЭМ}}(t_n)}{e(t_n)} = \frac{M_0}{k\Phi} + \frac{M_{1s}}{k\Phi} \cdot \sin(\Omega \cdot t_n) + \frac{M_{1c}}{k\Phi} \cdot \cos(\Omega \cdot t_n) + \dots + \\
\quad + \frac{M_{ns}}{k\Phi} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_n) + \frac{M_{nc}}{k\Phi} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_n) + \frac{J}{(k\Phi)^2} \cdot \frac{de(t_n)}{dt}
\end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{P_{\text{ЭМ}}(t_0)}{e(t_0)} \cdot \frac{(k\Phi)^2}{J} - \frac{M_0 \cdot k\Phi}{J} + \frac{M_{1s} \cdot k\Phi}{J} \cdot \sin(\Omega \cdot t_0) + \frac{M_{1c} \cdot k\Phi}{J} \cdot \cos(\Omega \cdot t_0) + \dots + \\
\quad + \frac{M_{ns} \cdot k\Phi}{J} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_0) + \frac{M_{nc} \cdot k\Phi}{J} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_0) = \frac{de(t_0)}{dt}; \\
\quad \dots \quad \dots \\
\frac{P_{\text{ЭМ}}(t_n)}{e(t_n)} \cdot \frac{(k\Phi)^2}{J} - \frac{M_0 \cdot k\Phi}{J} + \frac{M_{1s} \cdot k\Phi}{J} \cdot \sin(\Omega \cdot t_n) + \frac{M_{1c} \cdot k\Phi}{J} \cdot \cos(\Omega \cdot t_n) + \dots + \\
\quad + \frac{M_{ns} \cdot k\Phi}{J} \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t_n) + \frac{M_{nc} \cdot k\Phi}{J} \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t_n) = \frac{de(t_n)}{dt}.
\end{array} \right.$$

Из данных систем нельзя непосредственно определить параметры M_i , $k\Phi$, J : результатом решения являются их комбинации. Определить параметры можно, предположив, что известен диапазон их изменения. При этом необходимо учитывать, что статический момент, поток и момент инерции могут зависеть как от скорости вращения, так и от нагрузки и времени.

Возможны три случая: 1) изменяется один из трех параметров; 2) изменяются два параметра; 3) изменяются все три параметра. При этом неизменяющиеся параметры могут быть как известными, так и неизвестными.

Случай неизменного момента инерции наиболее распространен в практике. Момент инерции может быть определен точно или взят из литературных источников.

Представим имеющиеся коэффициенты в следующем виде:

$$a_1 = \frac{M_i}{k\Phi}; \quad a_2 = \frac{J}{(k\Phi)^2}; \quad a_3 = \frac{(k\Phi)^2}{J}; \quad a_4 = \frac{k\Phi \cdot M_i}{J}.$$

Если задаться минимальным J_{\min} и максимальным J_{\max} значением момента инерции, то справедливы следующие выражения:

$$k\Phi_1 = \sqrt{J_{\min} \cdot a_3}; M_{i1} = a_4 \cdot \frac{J_{\min}}{k\Phi_1} = a_4 \cdot \sqrt{\frac{J_{\min}}{a_3}}; k\Phi_2 = \sqrt{J_{\max} \cdot a_3}; M_{i2} = a_4 \cdot \frac{J_{\max}}{k\Phi_2} = a_4 \cdot \sqrt{\frac{J_{\max}}{a_3}}.$$

Теперь при одном известном параметре J остальные параметры определяются однозначно.

На рис. 3 представлены графические зависимости возможных решений в осях J , M_i , $k\Phi$.

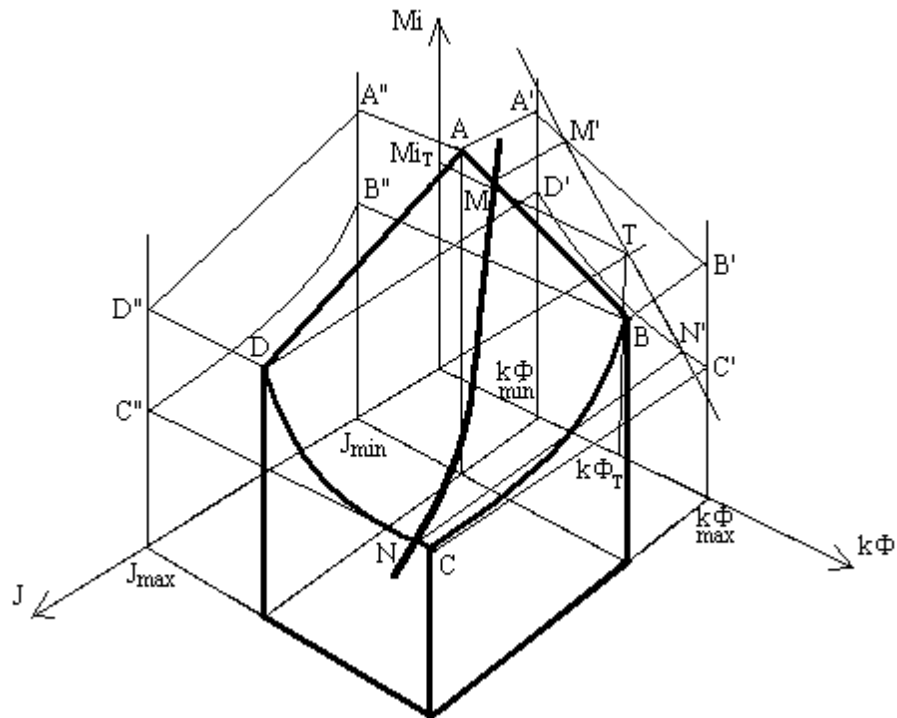


Рис.3. Графическая интерпретация решение в координатах M_i , J , $k\Phi$.

Гипербола в осях M_i , J , $k\Phi$ определяется зависимостью: $a_4 \cdot J = M_i \cdot k\Phi$. Возможные решения соответствуют точкам на отрезке AB .

С учетом сделанных выше допущений точкам J_{\min} и J_{\max} соответствуют решения на кривой MN для заданных значений a_1 , a_2 , a_3 , a_4 . Проекция этой кривой на плоскость $k\Phi M_i$ - кривая $M'N'$. Для нахождения полного решения определим координаты точек M' и N' :

$$M' \{k\Phi_1, M_1\} = M' \left\{ \sqrt{a_3 \cdot J_{\min}}, a_4 \cdot \sqrt{\frac{J_{\min}}{a_3}} \right\}$$

$$N' \{k\Phi_2, M_2\} = N' \left\{ \sqrt{a_3 \cdot J_{\max}}, a_4 \cdot \sqrt{\frac{J_{\max}}{a_3}} \right\}$$

Уравнение простейшей кривой - прямой, проходящей через точки M' и N' :

$$M = M_0 - b \cdot k\Phi \quad (9)$$

Для J_{\min} и J_{\max} имеем:

$$k\Phi_1 = \sqrt{J_{\min} \cdot a_3}; \quad M_{i1} = a_4 \cdot \frac{J_{\min}}{k\Phi_1} = a_4 \cdot \sqrt{\frac{J_{\min}}{a_3}};$$

$$k\Phi_2 = \sqrt{J_{\max} \cdot a_3}; \quad M_{i2} = a_4 \cdot \frac{J_{\max}}{k\Phi_2} = a_4 \cdot \sqrt{\frac{J_{\max}}{a_3}}.$$

Теперь при одном известном параметре J остальные параметры определяются однозначно. Подставив в уравнение координаты точек M' и N' , получим систему:

$$\begin{cases} M_1 = M_0 - b \cdot k\Phi_1; \\ M_2 = M_0 - b \cdot k\Phi_2; \end{cases}$$

из которой находим b и M_0 : $b = \frac{M_2 - M_1}{k\Phi_1 - k\Phi_2}$; $M_0 = M_1 - b \cdot k\Phi_1$.

Из выражения для коэффициента a_1 :

$$M_i = a_1 \cdot k\Phi, \quad (10)$$

что представляет собой уравнение прямой, проходящей через начало координат. Полученная зависимость (9) и прямая (10) пересекаются в одной точке T с координатами $k\Phi_T$, M_T :

$$a_1 \cdot k\Phi_T = M_0 - b \cdot k\Phi_T \Rightarrow k\Phi_T = \frac{M_0}{a_1 + b}, \quad M_T = a_1 \cdot k\Phi_T$$

Выполнив соответствующие преобразования, получим значение момента инерции:

$$J_T = \frac{k\Phi_T^2}{a_3}.$$

Рассмотренные преобразования выполняются для нулевой гармоники и однозначно определяется момент инерции J , поток $k\Phi$ и постоянная составляющая момента нагрузки M_0 . Затем, решая систему уравнений на основе выражения для энергетического баланса для механической части (4), определяем остальные гармонические составляющие момента нагрузки.

4. Вычислительный эксперимент

Выполним иллюстрацию рассмотренного способа диагностики с помощью модели ТП-Д.

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения с параметрами:

$$\begin{array}{ll} R_s=0.1019 \text{ Ом} & L_s=4.66 \text{ мГн} \\ T_m=0.217 \text{ с} & T_\gamma=0.0046 \text{ с} \\ J_s=90 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 & kF_H=6.64 \text{ Вс} \\ \omega_H=108.9 \text{ с}^{-1} & P_H=360 \text{ кВт} \\ U_{y \max}=5 \text{ В} & k_{ТП}=125 \end{array}$$

Структурная схема системы привода приведена на рис.4.

Расчет параметров двигателя по приведенной выше методике:

$$J_{\min}=85; \quad J_{\max}=95.$$

Число гармоник 6.

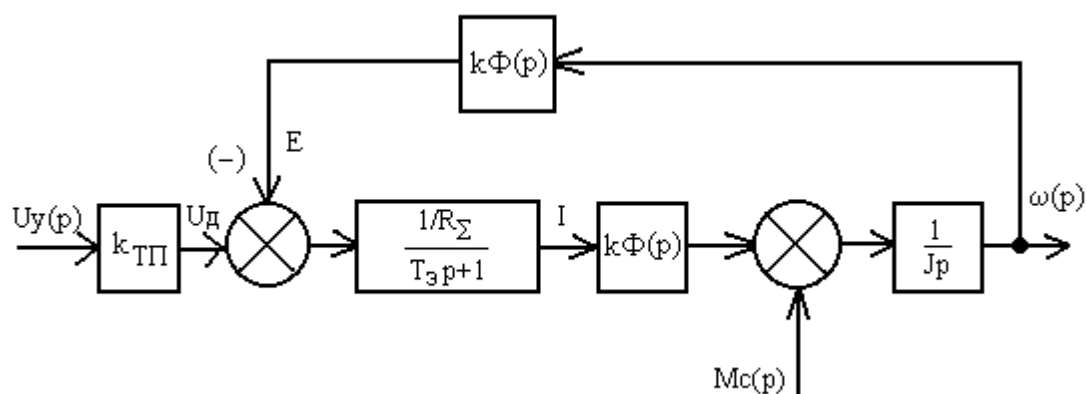


Рис.4. Структурная схема системы привода.

Гар- мо- ника	Ток		Напряжение		Мощность	
	sin	cos	sin	cos	sin	cos
0	-9468.68	0	161.313	0	496630	0
1	-3386.41	-640.139	-68.5324	-3.0204	98720	-54516.3
2	1044.25	-2218.14	47.0783	-71.648	18627.1	-25437.1
3	689.964	2020.98	10.0678	39.5457	76044.7	-199642
4	3158.2	-6366.83	57.6849	-90.519	-1.16e+6	-899889
5	65.8295	-2177.98	-8.03764	-45.131	217070	1.117e+6
6	1648.46	-152.693	47.0567	9.46072	180984	66223.4

Гар- мо- ника	ЭДС		Момент		Скорость	
	sin	cos	sin	cos	sin	cos
0	311.156	0	23515.9	0	44.2928	0
1	0.772131	-1.19272	-560.903	1385.42	0.109912	-0.16978
2	0.209229	-0.33072	-785.38	134.117	0.029783	-0.04707
3	1.54033	-2.16892	1142.11	-280.808	0.219264	-0.30874
4	5.60819	-19.9571	1130.41	309.66	0.79832	-2.84087
5	14.3302	5.62605	-787.004	-159.441	2.03989	0.800863
6	2.37701	0.313696	-525.041	-1396.93	0.338366	0.044654

Константы электрической модели:

$R=0.0970226$ Ом;

$L=0.00439442$ мГн;

$(kF^2)/J=0.548762$;

$kF=7.02498$ В·с;

$$J=89.9305 \quad \text{кг}\cdot\text{м}^2.$$

5. Выводы

1. При моделировании систем электропривода важную роль играют оптимизированные библиотеки алгоритмов, реализующие основные численные методы в задачах линейной алгебры. Опыт составления подобной библиотеки показал эффективность её реализации средствами ООП как набора классов на языке C++.
2. Минимизация экспериментальной информации позволяет сделать систему управления электроприводом полностью универсальной, её можно использовать для двигателей любого типа, так как настройка системы может происходить автоматически по минимуму измеренных параметров.
3. Предложенный метод определения параметров системы электропривода для случая неизменного момента инерции является достаточно приближенным и дает приемлемую точность при достаточно узком диапазоне J_{\min} и J_{\max} . Для повышения точности метода необходимо кривую $M'N'$ аппроксимировать полиномом более высокой степени, чем первой.

Литература

1. Бабак В.П., Хандецкий В.С., Шрюфер Е.О. Обробка сигналів - К.: Либідь, 1996.
2. Боглаев Ю.П. Вычислительная математика и программирование - М.: Высшая школа, 1990.
3. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе - М.: Энергия, 1977.
4. Завізна Н.С., Семеріков С.О., Хараджян О.А. Ефективне використання ресурсів комп'ютера в курсі «Основи комп'ютерного моделювання»./ Новітні технології навчання у вищих та середніх навчальних закладах. Збірник матеріалів міжнародної науково-методичної конференції, 7-9 жовтня 1997 р. – Рівне: УДАВГ, 1997..
5. Ключев В.И. Теория электропривода - М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Корытин А.М., Петров Н.К., Радимов С.Н., Шапарев Н.К. Автоматизация типовых технологических процессов и установок - М.: Энергоиздат, 1988.
7. Пак В.В., Носенко Ю.Л. Высшая математика - Донецк: Сталкер, 1997.
8. Родькин Д.И. Энергодиагностика привода. - К.: Техника, 1997.
9. Семеріков С. О., Завізна Н. С. Комп'ютерна підтримка факультативного курсу алгебри та числових систем / Освітні стандарти та зміст шкільних і вузівських курсів інформатики. Бердянськ, 10-12 червня 1997 року.
10. Семеріков С. О., Завізна Н. С. Особливості застосування алгебраїчних структур при комп'ютерному моделюванні електронних та атомних процесів у фізиці твердого тіла / Сучасні технології в аерокосмічному комплексі. Житомир, 9-11 вересня 1997 року.
11. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин (АВМ) - М.: Высшая школа, 1980.
12. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода - М.: Энергия, 1979.

13.Хараджян А.А., Семериков С.А., Завизена Н.С. Использование алгебраических структур при моделировании атомных процессов в физике твёрдого тела (факультативный курс) / ELBRUS'97 Новые информационные технологии и их региональное развитие. КБГУ, 20-24 октября 1997 года.