

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Курпий А.А. асп.

Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина

E-mail: thirdreih@yandex.ru

Предложен алгоритм и программное обеспечение для реализации автоматизированной процедуры составления системы идентификационных уравнений при использовании энергетического метода.

Ключевые слова: мгновенная мощность, гармонические составляющие, система идентификационных уравнений, Т-образная схема замещения.

Введение. Существуют различные методы определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей, с помощью которых рассчитываются механические и электро-механические характеристики асинхронного двигателя, а также потери в электрической машине. Одним из методов для идентификации электромагнитных параметров асинхронного двигателя является метод энергодиагностики, который основывается на полных уравнениях баланса составляющих гармоник мгновенной мощности и позволяет идентифицировать параметры двигателя. Уравнения баланса составляются в соответствии с выбранной схемой замещения асинхронного двигателя. Изменение схемы замещения ведет к изменению системы уравнений энергетического баланса. Для работы системы необходимо автоматизировать процесс идентификации электромагнитных параметров асинхронного двигателя, в частности, процедуру составления идентификационных уравнений, при использовании различных схем замещения электрических машин.

Цель работы. Разработка алгоритма автоматизации составления системы уравнений для идентификации параметров и программная реализация данного алгоритма.

Материал и результаты исследования. Процедура составления уравнений для идентификации параметров Т-образной схемы замещения требует организации математических операций над сигналами тока и напряжения, представленными гармоническими рядами вида:

$$\begin{aligned} u(t) &= \sum_{n=0}^N (U_n \cos(n\Omega t - f_n)) = \\ &= \sum_{n=0}^N (U_{na} \cos(n\Omega t) + U_{nb} \sin(n\Omega t)); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} i(t) &= \sum_{m=0}^M (I_m \cos(m\Omega t - \Psi_m)) = \\ &= \sum_{m=0}^M (I_{ma} \cos(m\Omega t) + I_{mb} \sin(m\Omega t)), \end{aligned} \quad (2)$$

где U_n и I_m – амплитуды n -й гармоники напряжения и m -й гармоники тока соответственно; f_n, Ψ_m – сдвиг фазы n -й гармоники напряжения и m -й гармоники тока; $U_{na}, U_{nb}, I_{ma}, I_{mb}$ – амплитуды гармоник напряжения и тока, косинусных и синусных составляющих соответственно.

В общем виде мгновенная мощность источника в системе определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} P(t) &= \sum_{n=0}^N U_{na} \cos(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) + \\ &+ \sum_{n=0}^N U_{nb} \sin(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{mb} \sin(m\Omega t) + \\ &+ \sum_{n=0}^N U_{na} \cos(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{mb} \sin(m\Omega t) + \\ &+ \sum_{n=0}^N U_{nb} \sin(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) = \sum_{k=0}^{K=M+N} P_{k0} + \\ &+ \sum_{k=1}^{K=M+N} (P_{kac} \cos(k\Omega t) + P_{kas} \cos(k\Omega t)) + \\ &+ \sum_{k=1}^{K=M+N} (P_{kbc} \sin(k\Omega t) + P_{kbs} \sin(k\Omega t)), \end{aligned} \quad (3)$$

где $P_{k0}, P_{kac}, P_{kbc}, P_{kas}, P_{kbs}$ – амплитуды постоянной, канонических (косинусных, синусных) и неканонических (косинусных, синусных) гармоник мощности; $k=m \pm n$ – номер гармоники мощности.

Канонические составляющие мгновенной мощности получены путем умножения одночастотных составляющих ($m=n$); неканонические гармоники – перемножением разночастотных составляющих ($m \neq n$).

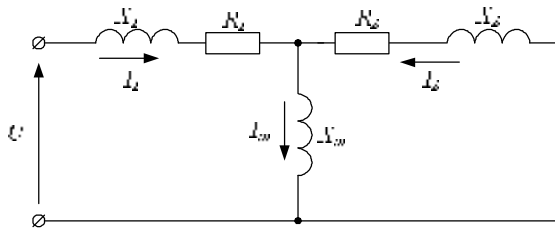


Рисунок 1 – Т-образная схема замещения АД

Рассмотрим Т-образную линейную схему замещения АД (рис. 1) с питанием от гармонического источника с частотой 50 Гц. Получив разложение сигналов тока и напряжения в ряд Фурье на промежутке, отличном от периода сигнала, и определив значение гармоник мощности для различного числа учитываемых гармоник тока и напряжения, можно отметить следующее. Пренебрежение высокочастотными гармониками приводит к появлению ошибки, которая уменьшается с ростом числа учитываемых гармоник. На рис. 2 представлена зависимость отношения значения к-й гармоники мощности (P'_k), рассчитанного при различном количестве входных гармоник, к истинному значению (P_k). В качестве истинного принято значение гармоники, рассчитанное путем разложения сигнала мощности, который получен умножением мгновенных значений тока и напряжения.

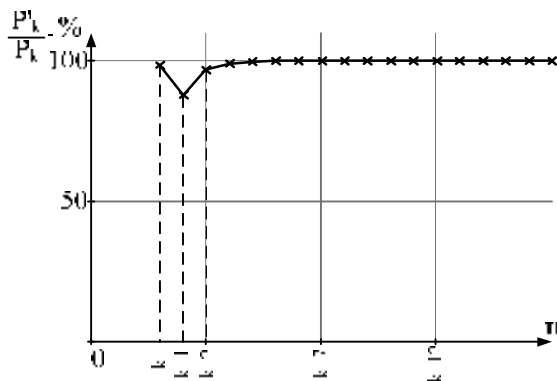


Рисунок 2 – Степень влияния количества входных гармоник тока и напряжения на уровень к-й гармоники мощности

Таким образом, следует, что применение метода идентификации на основе уравнений баланса мгновенных мощностей требует учета более чем 3-х гармонических составляющих тока и напряжения для составления данных уравнений, что представляет собой трудоемкую задачу. При умножении M гармоник тока и N гармоник напряжения необходимо произвести $M \times N$ операций умножения, в результате будут получены $2 \times M \times N$ выражения для гармоник мощности, после приведения которых могут быть получены значения $M+N$ гармоник мощности. Возникает вопрос об автоматизации процедуры составления

систем уравнений для различного количества гармоник.

В случаях, когда вычисления громоздки и трудоемки, применяется система символьных вычислений на ЭВМ, в которой используется объектно-ориентированное программирование [6]. Создание программы для реализации процедуры составления системы идентификационных уравнений требует наличия двух структур: структура для описания гармоник входных сигналов, структура для описания гармоник мощности. Назовем их условно структура 1 и структура 2 соответственно.

Пример массива структур 1 представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Пример структуры, описывающей входной сигнал

№	Поле 1	Поле 2	Поле 3	Поле 4	Поле 5	Поле 6
1	+1	0	1	a	2	cos
2	-5	0	U	b	5	sin
...
10	+3	2	1	a	2	sin

В табл. 1 отмечены поля структуры 1, необходимые для описания данного выражения:

- поле 1 – определяет, какой сигнал, ток или напряжение, используется;
- поле 2 – определяет функцию, используемую в выражении: $\sin(t)$ или $\cos(t)$;
- поле 3 – определяет знак, с которым выражение входит в уравнение; если данная гармоника отсутствует – поле равно 0, иначе оно принимает положительное или отрицательное значение, равное количеству одинаковых выражений в уравнении;
- поле 4 – определяет присутствие множителя вида $i\Omega$; если данная составляющая отсутствует, то поле равно нулю, если составляющая присутствует, то поле содержит значение i ;
- поле 5 – определяет номер гармоники;
- поле 6 – определяет, какая гармоника, косинусная (a) или синусная (b), сигнала тока или напряжения входит в выражение.

После загрузки данных сигналов тока и напряжения и определения спектрального анализа с помощью преобразования Фурье создаются массивы вышеописанных структур. Отдельно создаются массивы для синусных и косинусных составляющих сигналов напряжения, тока и производной тока.

Для сохранения рассчитанных выражений синусных и косинусных гармоник мощности источника, на активных и индуктивных сопротивлениях создаются массивы структур 2 со следующими полями:

- поле 1 – определяет, синусная или косинусная гармоника мощности;
- поле 2 – определяет номер гармоники k ;
- поле 3 содержит массив структур 1, описывающих гармоники напряжения, тока и производной тока, которые образуют k -ю гармонику мощности.

Форма записи массива для k -й гармоники мощности представлена на рис. 3.

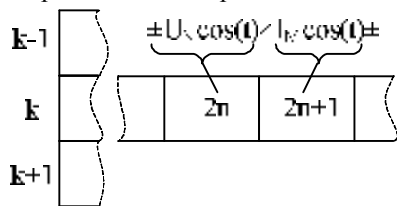


Рисунок 3 – Форма записи массива k -й гармоники мощности на источнике

Как видно на рис. 3, каждая составляющая, входящая в выражение k -й гармоники мощности, представлена двумя элементами массива.

Основной программной конструкцией является блок определения выражения полных уравнений мощности, который производит символьный расчет гармоник мощности, используя гармонические ряды тока и напряжения. В данном блоке реализованы операции умножения тригонометрических функций [5].

Перед началом операции умножения гармонических составляющих производится проверка поля 1 (табл. 1); если данное поле равно нулю, то гармоника не учитывается при расчете.

Для получения уравнений косинусной составляющей мощности применяются выражения умножения тригонометрических функций, входными массивами которых являются одноименные функции – только синусные или только косинусные массивы гармоник тока, напряжения или производной тока. Синусные составляющие мощности определяются умножением разноименных функций.

Работа с отдельными массивами для синусных и косинусных гармоник позволяет одновременно производить вычисление всех возможных комбинаций ($\sin a \sin b$, $\sin a \cos b$, $\sin b \cos a$, $\cos b \cos a$) для n -й и m -й гармоник за один цикл. На рис. 4 показан принцип формирования синусных и косинусных гармоник мощности источника.

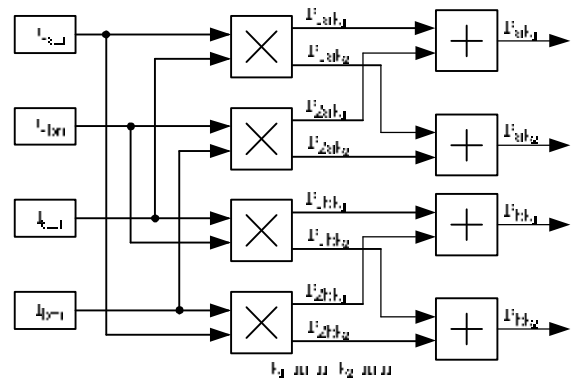


Рисунок 4 – Блок-схема расчета гармоник мощности источника

Поскольку вычисления производятся над гармониками, частоты которых кратны базовой частоте Ω , то для упрощения вычислений применяются только номера гармоник вместо аргументов $m\Omega t$ для тока и $n\Omega t$ для напряжения. Тогда номера гармоник мощности полностью определяются выражением $k = |m \pm n|$. Переменная k указывает на номер гармоники мощности и одновременно является индексом массива структур 2 (рис. 3). Данный индекс указывает ячейку, в которую необходимо записать полученную пару множителей. Таким образом, выражения для отдельных гармоник мощности получаются путем сохранения составляющих, относящихся к данной гармонике k , в один массив. Каждая новая составляющая записывается в конец массива.

Во время выполнения операции умножения выполняется проверка результата данной процедуры. Поскольку для синусной составляющей не существует нулевой гармоники, то поле 1 принимает нулевое значение, что указывает на отсутствие данной составляющей.

Вычисление мощности на активном и индуктивном сопротивлении производится по такому же алгоритму, как и для определения мощности источника. Отличие состоит в том, что при определении мощности на активном сопротивлении вместо сигнала напряжения используется сигнал тока, а на индуктивном – сигнал производной тока.

Для сокращения полученных выражений реализована процедура упрощения, которая выполняет приведение подобных. Алгоритм данной операции состоит в следующем. Рассматривается отдельно каждый массив элементов, формирующих k -ю синусную или косинусную гармонику мощности. В данном массиве производится поиск одинаковых пар элементов. Пары элементов считаются одинаковыми, если совпали поля 3, 4, 5 и 6. При этом поле 2 должно быть либо нулевым, либо отличным от нуля в одной и в другой паре.

Сравнение проводится с учетом возможной перестановки элементов в одной из пар, т.е. учитывается свойство коммутативности $A \times B = B \times A$. Если существуют две одинаковые пары, то пара, имеющая большее значение индекса массива, удаляется, а пара с меньшим индексом изменяется по следующему правилу. Если в поле 2 значения равны нулю, то в поле 1 первой пары записывается сумма данных полей в первой и второй паре, в противном случае – в поле 2 записывается сумма данных полей в рассматриваемых парах:

$$\begin{aligned} n\Omega I_{an} \cos(n\Omega t) I_{bm} \sin(m\Omega t) + \\ + m\Omega I_{an} \cos(n\Omega t) I_{bm} \sin(m\Omega t) = \\ = (n+m)\Omega I_{an} \cos(n\Omega t) I_{bm} \sin(m\Omega t). \end{aligned} \quad (4)$$

С целью экономии процессорного времени ЭВМ и повышения скорости расчета производится вычисление составляющих мощности только на активном и индуктивном сопротивлениях первой ветви и мощности источника. Выражения для составляющих мощности на элементах второй и третьей ветвей получаются путем замены гармоник тока первой ветви I_1 на гармоники тока второй и третьей I_2 и I_m соответственно.

Представление выражений в удобном для пользователя виде реализуется за счет сопоставления конкретных значений полей структур и определенных символьных выражений, которые записываются в текстовый файл в порядке,

соответствующем математической форме записи выражений.

Для проверки работоспособности программы выполнено сравнение результатов, полученных при составлении системы идентификационных уравнений вручную и с помощью разработанного программного обеспечения. Расчет проведен для сигналов тока и напряжения, состоящих из 3-х гармоник с частотами Ω , 2Ω и 3Ω (Ω – базовая частота) без учета нулевой составляющей. В табл. 2 приведены результаты вычисления для 1-й и 3-й косинусных и 6-й синусной гармоник мощности.

Идентичность полученных результатов подтверждает работоспособность программы. Проведенные испытания при расчете уравнений для 50 входных гармоник показали, что время выполнения составляет менее 10 секунд.

Выводы. Приведенный в статье алгоритм позволяет автоматически составлять системы уравнений для идентификации параметров при различном количестве входных гармоник тока и напряжения. Предложенный формат представления в программе полученных уравнений позволяет использовать результаты работы для реализации алгоритмов решения данных систем нелинейных уравнений. На следующем этапе развития данного программного обеспечения необходимо реализовать процедуру решения системы нелинейных уравнений.

Таблица 2 – Сравнение выражений, полученных вручную и с помощью программы

Ручной расчет	Программный расчет
$\begin{aligned} U_{a1} I_{1a2} + U_{a2} I_{1a1} + U_{a2} I_{a3} + U_{a3} I_{1a2} + U_{b1} I_{b2} + U_{b2} I_{b1} + U_{b2} I_{b3} + U_{b3} I_{b2} = \\ = (2 \cdot I_{1a1} I_{1a2} + 2 \cdot I_{1a3} I_{1a2} + 2 \cdot I_{1b2} I_{1b1} + 2 \cdot I_{1b3} I_{1b2}) \cdot R_1 + \\ + (\Omega \cdot (I_{1a1} I_{1b2} + I_{1a2} I_{1b3} - I_{1b1} I_{1a2} - I_{1b2} I_{1a3})) \cdot L_1 + \\ + (2 \cdot I_{2a1} I_{2a2} + 2 \cdot I_{2a2} I_{2a3} + 2 \cdot I_{2b1} I_{2b2} + 2 \cdot I_{2b2} I_{2b3}) \cdot R_2 + \\ + (\Omega \cdot (I_{2a1} I_{2b2} + I_{2a2} I_{2b3} - I_{2b1} I_{2a2} - I_{2b2} I_{2a3})) \cdot L_2 + \\ + (\Omega \cdot (I_{3a1} I_{3b2} + I_{3a2} I_{2b3} - I_{3b1} I_{3a2} - I_{3b2} I_{3a3})) \cdot L_m \end{aligned}$	$\begin{aligned} 1Ua1*I1a2+1Ub1*I1b2+1Ua2*I1a1+1Ub2*I1b1+ \\ +1Ua2*I1a3+1Ub2*I1b3+1Ua3*I1a2+1Ub3*I1b2= \\ =(2I1a1*I1a2+2I1b1*I1b2+2I1a2*I1a3+ \\ +2I1b2*I1b3)*R1+(1WI1b1*I1a2-1WI1a1*I1b2+ \\ +2WI1b2*I1a1-2WI1a2*I1b1+2WI1b2*I1a3- \\ -2WI1a2*I1b3+3WI1b3*I1a2-3WI1a3*I1b2)*L1+ \\ +(2I2a1*I2a2+2I2b1*I2b2+2I2a2*I2a3+ \\ +2I2b2*I2b3)*R2+(1WI2b1*I2a2-1WI2a1*I2b2+ \\ +2WI2b2*I2a1-2WI2a2*I2b1+2WI2b2*I2a3- \\ -2WI2a2*I2b3+3WI2b3*I2a2-3WI2a3*I2b2)*L2+ \\ +(1WI3b1*I3a2-1WI3a1*I3b2+2WI3b2*I3a1- \\ -2WI3a2*I3b1+2WI3b2*I3a3-2WI3a2*I3b3+ \\ +3WI3b3*I3a2-3WI3a3*I3b2)*Lm \end{aligned}$
$\begin{aligned} U_{a1} I_{a2} + U_{a2} I_{a1} - U_{b1} I_{b2} - U_{b2} I_{b1} = (2 \cdot I_{1a1} I_{1a2} - 2 \cdot I_{1b2} I_{1b1}) \cdot R_1 + \\ + (\Omega \cdot (3 \cdot I_{1a1} I_{1b2} + 3 \cdot I_{1b1} I_{1a2})) \cdot L_1 + (2 \cdot I_{2a2} I_{2a1} - 2 \cdot I_{2b2} I_{2b1}) \cdot R_2 + \\ + (\Omega \cdot (3 \cdot I_{2a1} I_{2b2} + 3 \cdot I_{2b1} I_{2a2})) \cdot L_2 + (\Omega \cdot (3 \cdot I_{3a1} I_{3b2} + 3 \cdot I_{3b1} I_{3a2})) \cdot L_m \end{aligned}$	$\begin{aligned} 1Ua1*I1a2-1Ub1*I1b2+1Ua2*I1a1-1Ub2*I1b1= \\ =(2I1a1*I1a2-2I1b1*I1b2)*R1+(1WI1b1*I1a2+ \\ +1WI1a1*I1b2+2WI1b2*I1a1+2WI1a2*I1b1)*L1+ \\ +(2I2a1*I2a2-2I2b1*I2b2)*R2+(1WI2b1*I2a2+ \\ +1WI2a1*I2b2+2WI2b2*I2a1+2WI2a2*I2b1)*L2+ \\ +(1WI3b1*I3a2+1WI3a1*I3b2+2WI3b2*I3a1+ \\ +2WI3a2*I3b1)*Lm \end{aligned}$

$U_{b_3} I_{a_3} + U_{a_3} I_{b_3} = (2I_{1a_3} I_{1b_3}) R_1 + (\Omega(-3I_{1a_3} I_{1a_3} + 3I_{1b_3} I_{1b_3})) L_1 +$ $+ (2I_{2a_3} I_{2b_3}) R_2 + (\Omega(-3I_{2a_3} I_{2a_3} + 3I_{2b_3} I_{2b_3})) L_2 +$ $+ (\Omega(-3I_{3a_3} I_{3a_3} + 3I_{3b_3} I_{3b_3})) L_m$	$1U_{b3}I_{1a3}+1I_{1b3}U_{a3}=(2I_{1b3}I_{1a3})R1+$ $+(3WI_{1b3}I_{1b3}-3WI_{1a3}I_{1a3})L1+$ $+(2I_{2b3}I_{2a3})R2+$ $+(3WI_{2b3}I_{2b3}-3WI_{2a3}I_{2a3})L2+$ $+(3WI_{3b3}I_{3b3}-3WI_{3a3}I_{3a3})Lm$
--	---

ЛІТЕРАТУРА

1. Ромашихин Ю. В. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей / Ю. В. Ромашихин, А. П. Калинов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44). – Ч. 2 – С. 130-136.
2. Купрій О. О. Операція декомпозиції при оцінці миттєвої потужності сигналів різної форми / О. О. Купрій, Т. В. Коренькова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2010. – Вип. 4/2010 (63). – Ч. 3 – С. 154-159.
3. Калінов А. П. Автоматизований метод розрахунку електричних кіл за складовими миттєвої потужності / А. П. Калінов, М. С. Малякова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 1/2009 (5). – Ч. 3 – С. 5-9.
4. Родькин Д. И. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов / Родькин Д. И. // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007. – С. 66–71.
5. Бронштейн Н. И. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. / Н. И. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с. ил.
6. Тан К. Ш. / Тан К. Ш., Стиб В.-Х., Харди Й. Символьный C++: Введение в компьютерную алгебру с использованием объектно-ориентированного программирования: Пер. со 2-го англ. изд. — М.: Мир, 2001. — 622 с., ил.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПІДГОТОВКИ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЕНЕРГЕТИЧНИМ МЕТОДОМ

Купрій О.О. асп.

Кременчуцький державний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна

E-mail: thirdreih@yandex.ru

Запропоновано алгоритм і програмне забезпечення для реалізації автоматизованої процедури складання системи ідентифікаційних рівнянь при використанні енергетичного методу.

Ключові слова: миттєва потужність, гармонійні складові, система ідентифікаційних рівнянь, Т-подібна схема заміщення.

AUTOMATION OF PREPARATION OF COMBINED EQUATIONS FOR IDENTIFICATION AND ESTIMATION OF ASYNCHRONOUS ENGINES PARAMETERS WITH POWER METHOD

Kupriy O., post-grad.

Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskiy State University

Pershotravneva St., 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine

E-mail: thirdreih@yandex.ru

An algorithm and software is offered for the automated procedure realization of the identification equalizations drafting system using power method.

Key words: instantaneous power, harmonic constituents, identification equalizations system, T-circuit of substitution.