

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Тиховод С. М., д. т. н.,

Афанасьева И. О., к. т. н.,

Романиченко Г. Н., инж.,

Козлов В. В., инж.

*Запорожский национальный технический университет*

e-mail: stikhovod@gmail.com

**Аннотация** – динамика разгона асинхронного двигателя зависит от ряда параметров двигателя (факторов). Выполнение экспериментов с перебором всех возможных значений факторов является непреодолимой задачей. Поэтому для сокращения количества выполняемых экспериментов используют планирование эксперимента. В статье рассмотрено планирование эксперимента, чтобы найти значения факторов, при которых достигается максимум целевой функции – частоты вращения  $\Omega$  за заданное время  $t_{\text{end}}$ . Разработаны универсальные компьютерные программы могут применяться для определения положения оптимума целевой функции любого устройства.

**Ключевые слова** – переходные электромеханические процессы, планирование эксперимента, факторы, асинхронный двигатель.

**Постановка задачи.** Пуск асинхронного двигателя (АД) приводит к возникновению электромеханического переходного процесса. Динамика разгона зависит от ряда параметров двигателя (факторов). Выполнение экспериментов с перебором всех возможных значений факторов является непреодолимой задачей. Поэтому для сокращения количества выполняемых экспериментов используют планирование эксперимента. Рассмотрим пуск двухфазного конденсаторного двигателя с фазным ротором. Факторами будем считать активное сопротивление цепи фазного ротора, а также емкость  $C_p$  фазосдвигающего конденсатора. Целевой функцией будем считать частоту вращения  $\Omega$ , которая достигается за заданное время  $t_{\text{end}}$ . Будем использовать планирование эксперимента, чтобы найти значения факторов, при которых достигается максимум целевой функции.

Планирование эксперимента предполагает выполнение эксперимента физического или компьютерного, использующего адекватную математическую модель. Мы будем использовать компьютерный эксперимент.

Для моделирования переходных процессов в электрических машинах, в настоящее время используется ряд универсальных программных комплексов. Наиболее распространенными являются пакеты EMTP [1], PSpice [2], Simulink [3]. Электромеханические переходные процессы могут быть весьма продолжительными, что требует значительного компьютерного времени для моделирования. Поэтому для моделирования выбран усовершенствованный метод численного решения уравнений состояния АД, который приводит к сокращению времени моделирования и повышению точности расчета [4]. В работе [4] приведены уравнения двухфазной электрической машины, которые записываются в системе координат  $dq$ , вращающейся с частотой вращения ротора  $\Omega$ . На основании математической модели [4] разработана компьютерная программа `Motor_as_ab_fun_c` на языке Matlab. Целевой функцией будем считать частоту вращения, которая достигается за заданное время  $t_{\text{end}}$ . Поскольку используется малое число факторов  $k=2$ , то достаточно использовать полный факторный эксперимент (ПФЭ) [5]. Использовать планирование эксперимента будем в два этапа. Первоначально выполняется линейное планирование, чтобы приблизиться к области оптимума. В квазистационарной области используется квадратичное планирование, которое позволит создать простую адекватную модель целевой функции.

Чтобы можно было использовать ПФЭ для приближения к оптимуму произвольной целевой функции, разработана универсальная компьютерная программа `PFE_3_1_M`. Программа начинается с обращения к подпрограмме `dataPFE_3_1`, задающей исходные данные и название подпрограммы-функции моделирования двухфазного конденсаторного двигателя: `[X0,fun]=dataPFE_3_1`. В данном случае идентификатор `fun` получает значение `Motor_as_ab_fun_c` – название подпрограммы. Для каждого объекта моделирования необходима особая подпрограмма.

В программе `PFE_3_1_M` значения обоих факторов нормируются, становятся безразмерными и обозначаются  $x_1, x_2$ . Область их изменения находится в пределах  $[-1,+1]$ . Для движения к точке оптимума нам нужна линейная модель:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2, \quad (1)$$

где  $x_1, x_2$  – безразмерные факторы;  
 $y$  – целевая функция.

Требуется найти по результатам эксперимента значения неизвестных коэффициентов модели. Для этого строится матрица планирования, которая приведена в табл. 1. В этой матрице единицы опущены, оставлены только знаки.

Таблица 1 – Матрица планирования линейного полного факторного эксперимента

№ опыта	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$y$
1	–	–	+	$y_1$
2	+	–	–	$y_2$
3	–	+	–	$y_3$
4	+	+	+	$y_4$

Данная матрица планирования обладает общими фундаментальными свойствами [5]: симметричность, условие нормировки, ортогональность, ротатабельность. Эти свойства позволяют определить независимые коэффициенты линейного полинома, которые определяют направление крутого восхождения к точке оптимума. Матрица планирования записывается как:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Значения целевой функции  $y$  в четырех точках составляют вектор  $\mathbf{Y}$ .

Согласно [5] вычисляется вспомогательная матрица

$$\mathbf{C} = \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}. \quad (3)$$

Тогда вектор коэффициентов полинома (1) определяется как:

$$\mathbf{B} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y}. \quad (4)$$

Зная коэффициенты  $b_1, b_2$  определяется направление движения по градиенту, вдоль которого с определенным шагом выполняется расчет целевой функции.

Такое движение по направлению градиента выполняется до тех пор, пока значение целевой функции возрастает. Как только значение целевой функции начинается убывать, движение прекращается, и значения факторов принимаются как значения текущего оптимума.

Эти значения принимаются далее, как начальные значения для следующего эксперимента. В окрестности этой точки определяются значения целевой функции, которые заново составляют вектор  $\mathbf{Y}$  и, согласно (4), вычисляется вектор коэффициентов полинома  $\mathbf{B}$ . Определяется новое направление движения по градиенту. Вновь

выполняется движение по направлению градиента, вдоль которого с определенным шагом выполняется расчет целевой функции до достижения максимума. После 2-3 таких экспериментов приближение к точке оптимума замедляется, поэтому продолжение таких экспериментов нецелесообразно.

Планы второго порядка позволяют сформировать функцию отклика в виде полного квадратичного полинома, который более точно аппроксимирует функцию отклика, чем линейный полином. Полный квадратичный полином содержит больше членов, чем линейный полином, сформированный по планам первого порядка. Планы второго порядка требуют большего числа выполняемых опытов.

Полный квадратичный полином при числе факторов  $k = 2$  содержит 6 членов:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2. \quad (5)$$

Если уже был ранее сформирован линейный план ПФЭ, то мы можем достроить этот план до плана второго порядка (композиционный план) и сформировать функцию отклика в виде полного квадратичного полинома, без потери информации о ранее сделанных опытах. Каждый фактор должен дополнительно фиксироваться в двух «звездных» точках, а также в центральной точке. Таким образом, при  $k = 2$  мы должны иметь 9 опытов.

Матрица планирования, показанная в табл. 2, обладает всеми фундаментальными свойствами. Эти свойства позволяют определить независимые коэффициенты квадратичного полинома. Коэффициенты полинома (5) могут быть определены по формуле (4).

Таблица 2 – Матрица планирования при  $k = 2$

	$i$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3=x_1x_2$	$x_4=x_1^2-a$	$x_5=x_2^2-a$	$y$
ПФЭ $2^2$	1	+1	-1	-1	+1	1/3	1/3	$y_1$
	2	+1	-1	+1	-1	1/3	1/3	$y_2$
	3	+1	+1	-1	-1	1/3	1/3	$y_3$
	4	+1	+1	+1	+1	1/3	1/3	$y_4$
Звездные точки	5	+1	-1	0	0	1/3	-2/3	$y_5$
	6	+1	+1	0	0	1/3	-2/3	$y_6$
	7	+1	0	-1	0	-2/3	1/3	$y_7$
	8	+1	0	+1	0	-2/3	1/3	$y_8$
Нулевая	9	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	$y_9$
$\Sigma x_{ij}$		$N$	0	0	0	0	0	

где для  $k = 2$   $a = 0,667$  [6].

Для выполнения квадратичного планирования разработана универсальная программа PFE\_3\_2\_M. В этой программе по девяти

значениям целевой функции, вычисляемых по подпрограмме dataPFE\_3\_1, автоматически вычисляются коэффициенты регрессии, и строится график целевой функции в квазистационарной области. Этот график, приведенный на рис. 1, позволяет наглядно отобразить вид целевой функции вблизи экстремума.

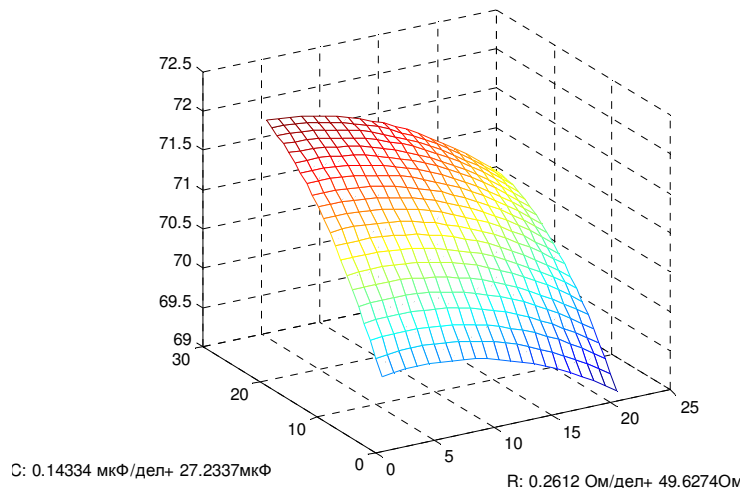


Рис. 1. Зависимость скорости вращения от значений факторов

Универсальные программы PFE\_3\_1\_M и PFE\_3\_2\_M могут использоваться для определения положения оптимума целевой функции любого устройства. Для этого необходимо иметь адекватную математическую модель устройства, подпрограмму вычисления целевой функции и подпрограмму задания исходных данных. При этом основные программы изменять не требуется

*Выводы.* Разработанные на основании представленного алгоритма программы хорошо показали себя при определении оптимальных значений факторов, обеспечивающих максимальный разгон асинхронного двигателя. Эти программы могут использоваться для определения значений факторов, обеспечивающих оптимум целевой функции любого устройства.

Литература:

1. *Domel H. W.* EMTP theory book. British Columbia: Microtran Power System Analysis Corporation. Vancouver, 1996. 631 p.

2. *Кеон Д.* OrCAD Pspice. Анализ электрических цепей. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 640 с.

3. *Черных И. В.* Simulink среда создания инженерных приложений. Москва: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.

4. Метод численного расчета электромеханических переходных процессов в асинхронных двигателях / К. В. Мищенко и др. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2019. № 1.

5. *Адлер Ю. П.* Введение в планирование эксперимента.

Москва: Металлургия, 1969. 320 с.

Б. Ивоботенко Б. А., Ильинский Н. Ф., Копылов И. П. Планирование эксперимента в электромеханике. Москва: Энергия, 1971. 185 с.

## ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Тиховод С. М., Афанасьєва І. О., Романиченко Г. М., Козлов В. В.

*Анотація* – динаміка розгону асинхронного двигуна залежить від ряду параметрів двигуна (факторів). Виконання експериментів з перебором всіх можливих значень факторів є неперекорним завданням. Тому для зменшення кількості виконуваних експериментів використовують планування експерименту. Електромеханічні перехідні процеси можуть бути тривалими у часі, що вимагає значних комп'ютерних ресурсів для моделювання. Тому для моделювання обрано удосконалений метод числового рішення рівнянь стану двигуна, який призведе до скороченню часу моделювання та підвищенню точності розрахунків.

У статті розглянуто планування експерименту, щоб знайти значення факторів, при яких досягається максимум цільової функції – частоти обертання  $\Omega$  за заданий час  $t_{\text{end}}$ .

Об'єктом дослідження є двофазний конденсаторний двигун з фазним ротором. Факторами є активний опір кола фазного ротора, а також ємність фазозсувного конденсатора. Планування експерименту передбачає виконання експерименту фізичного або комп'ютерного, що використовує адекватну математичну модель. У статті розглянуто використання комп'ютерного експерименту – запуску підпрограми, що моделює розгін асинхронного двигуна при заданих значеннях факторів. Оскільки використовується мале число факторів  $k$ , то використано повний факторний експеримент. Планування експерименту проведено в два етапи. Спочатку застосовується лінійне планування, щоб наблизитися до області оптимуму. Визначаються коефіцієнти лінійного полінома, які задають напрямок крутого сходження до точки оптимуму. Такий рух у напрямку градієнта дозволяє наблизитися до точки оптимуму. У квазістаціонарній області в другому етапі використовується квадратичне планування, яке дозволить створити модель цільової функції і визначити її вид.

Розроблені універсальні комп'ютерні програми можуть застосовуватися для визначення положення оптимуму цільової функції будь-якого пристрою.

## EXPERIMENT SCHEDULING FOR THE CHOICE OF OPTIMAL VALUES OF PARAMETERS FOR AN ASYNCHRONOUS ENGINES

S. Tikhovod, I. Afanasyeva, G. Romanichenko, V. Khozlov

### *Summary*

Start dynamic of an asynchronous engine depends on parameters series of the engine (factors). Realization of experiments by the way of looking over all possible values of factors is an insurmountable task. Therefore scheduling of an experiment for reduction of the carried-out number of experiments is used. Electromechanical transients can be lengthy. This requires significant computer time for simulation. Therefore, an improved method for the numerical solution of the equations of state of an induction motor was chosen for simulation, which leads to a reduction in simulation time and an increase in the accuracy of calculations. In this article scheduling of an experiment is considered to find factors values at which the maximum of target function (rotation frequency  $\Omega$ ) for the given time  $t_{\text{end}}$  is reached.

Object of a research is the two-phase condenser engine with a phase rotor. Factors are the active resistance of a phase rotor circuit and also capacity of the phase-shifting condenser. Scheduling of an experiment assumes realization of physical or computer experiment, using adequate mathematical model. Application of a computer experiment using of the subprogram for modeling stage of start an asynchronous engine at the preset values of factors is considered in this article. As there is a little number of factors  $k$ , the complete factorial experiment is used. Scheduling of an experiment is carried out in two steps. First of all the linear programming is applied to approach area of an optimum. Coefficients of the linear polynomial which setup the direction of abrupt ascent to an optimum point are defined.

The developed universal computer's programs can be applied to definition of an optimum of target function location for any device.