

УДК 621.317.4

ПРОЕКЦИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Ланкин А.М.*ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: lankinjohn@rambler.ru*

В статье описано применение одного из проекционных методов – метода главных компонент к динамическим характеристикам намагничивания. Метод главных компонент позволяет выявить латентные признаки и одновременно уменьшить размерность исходных данных, пожертвовав малозначимой информацией. С помощью приведенного подхода динамическая характеристика намагничивания преобразуется в точку в пространстве главных компонент, что позволяет ограничиться только значимой информацией и исключить случайные помехи и случайные составляющие погрешности измерений. Рассмотрены полученные экспериментальные результаты по применению метода главных компонент к динамическим характеристикам намагничивания пропорциональных электромагнитов с различными отклонениями, возникшими в ходе их технологического процесса производства. Для исследуемых динамических характеристик намагничивания первые две компоненты позволили описать более 99% общей дисперсии.

Ключевые слова: динамическая характеристика намагничивания, проекционные методы, метод главных компонент

PROJECTION DYNAMIC MAGNETIZATION CHARACTERISTIC OF THE ELECTROMAGNETS BY PRINCIPAL COMPONENTS METHOD

Lankin A.M.*Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Educational «Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)», Novocherkassk, e-mail: lankinjohn@rambler.ru*

The article describes the use of one of the projection methods – principal component analysis to the dynamic characteristics of the magnetization. The method of principal component analysis allows to reveal latent characteristics and at the same time to reduce the dimensionality of the original data, sacrificing a meaningless information. With the above approach, the dynamic characteristic of the magnetization is converted to a point in space, the main component that allows only limited meaningful information and eliminate random noise and random components of measurement error. We consider the experimental results obtained by the use of principal component analysis to the dynamic characteristics of the magnetization proportional solenoids with various disabilities, arise in the course of their technological process. The first two components are allowed to describe more than 99% of the total variance to study the dynamic characteristics of the magnetization.

Keywords: dynamic characteristic magnetization, projection methods, principal component analysis

Как известно, динамическая характеристика намагничивания (ДХН) пропорционального электромагнита содержит латентную информацию о большинстве его параметров [3, 4, 5], однако она имеет сложный, неоднозначный характер, что затрудняет ее анализ, с целью выявления информации, требуемой для выработки управляющих технологическим процессом сигналов. Поэтому необходимо снижать размерность анализируемой информации с помощью проекционных подходов.

Для снижения размерности анализируемой информации в настоящее время находит применение проекционный подход, использующий метод главных компонент (ГК), для снижения размерности анализируемой информации [1]. Сущность метода главных компонент состоит в переходе от исходных переменных к новым величинам – главным компонентам, которые пред-

ставляют собой линейные комбинации исходных переменных [2]. При этом первая главная компонента описывает максимальную дисперсию и является нормированной линейной комбинацией всех возможных исходных признаков, а вторая – учитывает максимальное значение оставшейся дисперсии и корреляционно не связана с первой компонентой и так далее до n (n – количество ГК). Обычно учитываются только $(n - l)$ наибольших ГК, сумма значимостей которых лежит в пределах 0,8–0,99 (l – количество незначимых ГК).

Рассмотрим применение метода главных компонент к группе содержащей k ДХН пропорциональных электромагнитных приводов. Координаты точек $i(\Phi)$ в силу зависимости их от многих технологических режимов и неучитываемых случайных помех, а также наличия случайной составляющей погрешности измерения можно считать

случайными величинами. Исходя из этого, координаты точек каждой ДХН будем рассматривать как вектор.

На исходной кривой выберем n фиксированных значений магнитного потока

$$\Phi_d = d \cdot \Delta\Phi;$$

$$\Delta\Phi = \Phi_{\max}/n,$$

где Φ_{\max} – максимально возможное значение потока для всех исследуемых характеристик; n – выбранное количество фиксированных значений потока; d – номер точки.

Определяются значения токов $i_1(\Phi_d)$, которые и являются элементами формируемого вектора I_1 .

$$I_1 = \begin{bmatrix} i_1(\Phi_1) \\ i_1(\Phi_2) \\ \dots \\ i_1(\Phi_d) \\ \dots \\ i_1(\Phi_n) \end{bmatrix}.$$

Аналогично формируются векторы для других ДХН, причём значения токов i определяются для тех же фиксированных значений магнитного потока Φ_d .

Здесь хотелось бы отметить, что применение кусочной аппроксимации к ДХН позволяет вычислить путем интерполяции недостающие значения векторов $i_j(\Phi_d)$, в случае если $\Phi_{j\max}$ меньше, чем Φ_{\max} .

Полученные таким образом векторы записываются в одну матрицу \mathbf{I} размерности $n \times k$, где n – количество фиксируемых точек, а k – число исследуемых кривых:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_1(\Phi_1) & i_2(\Phi_1) & \dots & i_j(\Phi_1) & \dots & i_k(\Phi_1) \\ i_1(\Phi_2) & i_2(\Phi_2) & \dots & i_j(\Phi_2) & \dots & i_k(\Phi_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ i_1(\Phi_d) & i_2(\Phi_d) & \dots & i_j(\Phi_d) & \dots & i_k(\Phi_d) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ i_1(\Phi_n) & i_2(\Phi_n) & & i_j(\Phi_n) & & i_k(\Phi_n) \end{bmatrix}.$$

Для нахождения ковариации определим вектор выборочных средних по строкам \bar{I}_d . Следующим шагом определим отклонения от среднего для каждого наблюдения и сведём эти отклонения в матрицу \mathbf{F} , каждый элемент которой формируется по следующей формуле:

$$f_{dj} = I_j(\Phi_d) - \bar{I}_d, \quad d = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots k.$$

Поскольку значение числа наблюдений n ограничено, то можно найти лишь оценку ковариации S :

$$S = \frac{\mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T}{k-1}.$$

Найдём вектор характеристических чисел \mathbf{L} и матрицу характеристических векторов \mathbf{B} матрицы \mathbf{S} :

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{21} & \dots & \beta_{n1} \\ \beta_{12} & \beta_{22} & \dots & \beta_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \beta_{1n} & \beta_{2n} & \dots & \beta_{nn} \end{bmatrix}.$$

Используя полученные матрицы, найдём ГК. Размерность пространства, в котором распределены точки матрицы \mathbf{I} , равна числу строк этой матрицы, т.е. n , тогда

$$\mathbf{Z} = \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{I}.$$

Размерность получаемой матрицы такая же, как и у матрицы \mathbf{I} :

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{21} & \dots & z_{k1} \\ z_{12} & z_{22} & \dots & z_{k2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{1l} & z_{2l} & \dots & z_{kl} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{1n} & z_{2n} & \dots & z_{kn} \end{bmatrix}.$$

Полученные таким образом ГК упорядочиваются в соответствии со значимостью, т.е. по возрастанию соответствующих собственных чисел.

Как указывалось выше, не все ГК являются значимыми, поэтому отбросим незначимые l ГК, оставив только $(n-l)$ компонент. При правильном определении числа l оставшиеся главные компоненты несут в себе всю необходимую информацию об исходном распределении. В то время как отброшенные ГК содержат в себе информацию о случайной помехе или шуме. Отбрасывание l главных компонент означает, что размерность пространства, в которое проецируются точки исходного распределения, сокращается, т.е. сокращается число базисных векторов пространства ГК. Поскольку в рассматриваемом пространстве в качестве базисных векторов выступают характеристические векторы матрицы \mathbf{S} , то вместе с уменьшением числа ГК необходимо уменьшить и число характеристических векторов. Таким образом, после описанных

преобразований матриц \mathbf{Z} и \mathbf{B} имеем следующий вид:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{21} & \dots & z_{k1} \\ z_{12} & z_{22} & \dots & z_{k2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_{1n-l} & z_{2n-l} & \dots & z_{kn-l} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{21} & \dots & \beta_{n1} \\ \beta_{12} & \beta_{22} & \dots & \beta_{n2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \beta_{1n-l} & \beta_{2n-l} & \dots & \beta_{nn-l} \end{bmatrix}.$$

Суммарная размерность получившихся матриц при достаточно большом l будет меньше размерности исходной матрицы \mathbf{I} .

Таким образом, по результатам этого шага мы получаем новое пространство главных компонент, каждая точка которого представляет собой ДХН конкретного изделия.

В качестве примера спроецируем ДХН1 – ДХН9 с различными технологическими отклонениями в пространство ГК. Вначале сформируем исходную матрицу токов \mathbf{I} . Для этого для каждой ДХН используем следующий подход: задавшись максимальным значением $\Phi_{\max} = 0,17$ Вб и количеством фиксируемых точек $n = 35$, определяем $\Delta\Phi = 0,005$ и определяем значения токов $i_j(\Phi_d)$.

На рис. 1 представлены ДХН1-ДХН9, а в табл. 1 соответствующие им отклонения параметров. Табл. 2 содержит значения токов матрицы \mathbf{I} для ДХН1-ДХН9, а табл. 3 – соответствующие значения вычисленных ГК \mathbf{Z} . Существует верхний предел количества возможных ГК, который для централизованных величин равен k , а для нецентрализованных $k - 1$, однако количество ГК не может быть больше n [6]. Таким образом, максимально возможное количество ГК для проводимого эксперимента девять.

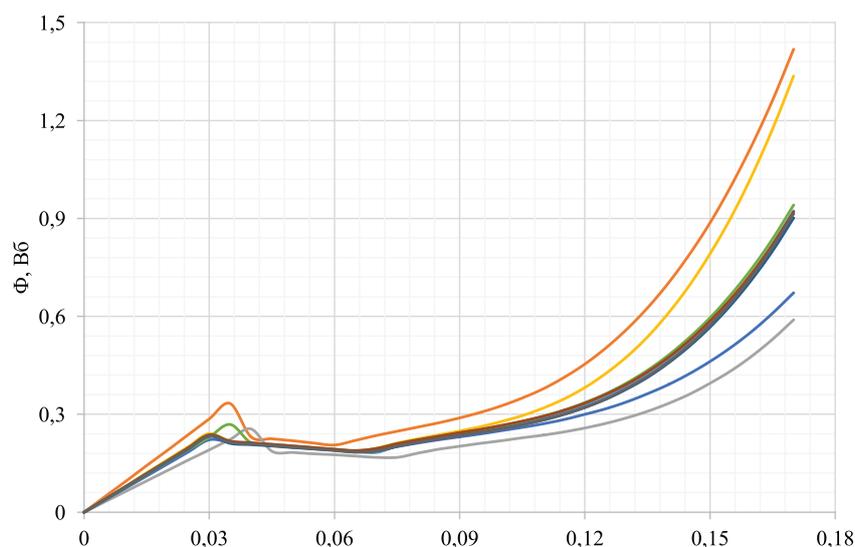


Рис. 1. ДХН пропорциональных электромагнитов с технологическими отступлениями от номинала

Таблица 1

Типы дефектов в исследуемых пропорциональных электромагнитах

Номер ДХН	Вид технологического отступления от номинала	Максимальное значение магнитного потока, Вб
1	2	3
1	Без технологических отступлений	0,147
2	На 10% от номинала уменьшено количество витков рабочей обмотки	0,129
3	На 10% от номинала увеличено количество витков рабочей обмотки	0,166
4	На 10% от номинала уменьшена индукция насыщения магнитного материала якоря	0,136
5	На 10% от номинала увеличена индукция насыщения магнитного материала якоря	0,158

Окончание табл. 1

1	2	3
6	На 10% от номинала уменьшена индукция насыщения магнитного материала ярма	0,146
7	На 10% от номинала увеличена индукция насыщения магнитного материала ярма	0,148
8	На 10% от номинала уменьшена индукция насыщения магнитного материала корпуса	0,146
9	На 10% от номинала увеличена индукция насыщения магнитного материала корпуса	0,148

Таблица 2

Значения магнитного потока и токов ДХН1–ДХН9

Магнитный поток, Вб	Ток, А								
	ДХН 1	ДХН 2	ДХН 3	ДХН 4	ДХН 5	ДХН 6	ДХН 7	ДХН 8	ДХН 9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,005	0,039	0,048	0,032	0,040	0,037	0,038	0,039	0,040	0,039
0,01	0,078	0,095	0,064	0,080	0,074	0,077	0,078	0,079	0,078
0,015	0,118	0,143	0,096	0,121	0,111	0,115	0,116	0,119	0,117
0,02	0,157	0,190	0,128	0,161	0,148	0,154	0,155	0,158	0,156
0,025	0,196	0,238	0,160	0,201	0,185	0,192	0,194	0,198	0,194
0,03	0,235	0,286	0,191	0,241	0,222	0,230	0,233	0,237	0,233
0,035	0,215	0,333	0,223	0,215	0,214	0,269	0,211	0,218	0,214
0,04	0,211	0,231	0,255	0,210	0,209	0,213	0,207	0,213	0,209
0,045	0,206	0,225	0,187	0,205	0,205	0,208	0,203	0,208	0,204
0,05	0,201	0,219	0,183	0,200	0,200	0,203	0,198	0,203	0,199
0,055	0,197	0,212	0,179	0,195	0,196	0,198	0,194	0,198	0,194
0,06	0,192	0,206	0,176	0,191	0,191	0,193	0,190	0,193	0,189
0,065	0,187	0,220	0,172	0,186	0,187	0,188	0,185	0,189	0,184
0,07	0,183	0,235	0,168	0,196	0,188	0,195	0,188	0,195	0,187
0,075	0,203	0,248	0,168	0,212	0,201	0,209	0,202	0,210	0,202
0,08	0,216	0,261	0,181	0,225	0,212	0,221	0,215	0,222	0,214
0,085	0,228	0,274	0,193	0,237	0,222	0,232	0,225	0,233	0,225
0,09	0,239	0,289	0,202	0,249	0,231	0,243	0,236	0,244	0,235
0,095	0,250	0,306	0,211	0,262	0,240	0,253	0,245	0,254	0,245
0,1	0,261	0,326	0,219	0,278	0,250	0,265	0,256	0,266	0,255
0,105	0,273	0,350	0,228	0,296	0,260	0,278	0,268	0,279	0,268
0,11	0,288	0,378	0,236	0,319	0,271	0,294	0,283	0,294	0,282
0,115	0,306	0,413	0,246	0,347	0,284	0,313	0,300	0,312	0,300
0,12	0,327	0,454	0,258	0,382	0,300	0,336	0,321	0,334	0,321
0,125	0,353	0,503	0,272	0,425	0,317	0,363	0,346	0,361	0,347
0,13	0,384	0,560	0,289	0,476	0,338	0,396	0,377	0,392	0,379
0,135	0,422	0,626	0,309	0,537	0,363	0,435	0,413	0,430	0,416
0,14	0,466	0,702	0,333	0,610	0,391	0,481	0,457	0,474	0,460
0,145	0,518	0,789	0,361	0,694	0,424	0,535	0,508	0,526	0,512
0,15	0,579	0,887	0,395	0,792	0,462	0,596	0,567	0,586	0,573
0,155	0,649	0,999	0,433	0,903	0,505	0,667	0,635	0,654	0,642
0,16	0,729	1,124	0,478	1,031	0,554	0,747	0,713	0,732	0,722
0,165	0,820	1,263	0,530	1,175	0,610	0,838	0,801	0,821	0,812
0,17	0,923	1,418	0,589	1,336	0,672	0,941	0,901	0,920	0,914

Таблица 3

Значения ГК для ДХН1–ДХН9

Номер ГК \ Номер ДХН	ГК 1	ГК 2, $\cdot 10^2$	ГК 3, $\cdot 10^2$	ГК 4, $\cdot 10^2$	ГК 5, $\cdot 10^3$	ГК 6, $\cdot 10^3$	ГК 7, $\cdot 10^3$	ГК 8, $\cdot 10^3$	ГК 9, $\cdot 10^3$
1	-0,99990	-0,864	0,919	-0,627	1,070	1,563	1,597	0,107	-0,057
2	-0,99928	-2,184	-2,755	1,440	-1,616	1,284	-0,012	0,050	0,018
3	-0,99849	4,793	2,382	1,216	-1,824	0,124	-0,002	-0,022	0,006
4	-0,99923	-3,755	1,029	0,031	-3,765	-2,362	0,277	0,211	0,042
5	-0,99864	4,379	-2,664	-0,931	-1,153	-0,976	0,178	0,261	0,028
6	-0,99995	-0,325	-0,200	0,570	7,422	-1,423	0,035	-0,084	-0,006
7	-0,99993	-0,755	0,691	-0,650	0,587	0,954	-0,671	-0,092	0,445
8	-0,99998	-0,368	-0,195	-0,538	-1,386	-0,029	-0,279	-0,969	-0,189
9	-0,99991	-0,913	0,793	-0,510	0,658	0,864	-1,123	0,538	-0,286

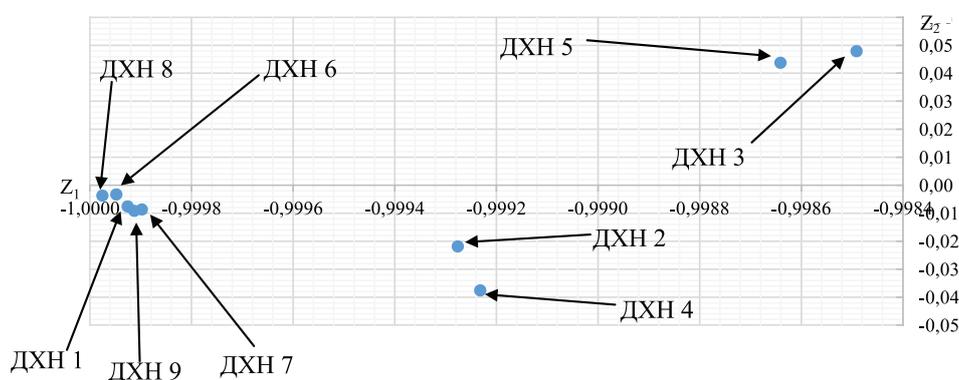


Рис. 2. Проекция измеренных ДХН в пространство ГК

В табл. 4 приведены значения описанной дисперсии для разного количества использованных ГК. Из таблицы видно, что достаточно использовать всего две ГК, описывающие более 95% всей дисперсии, а дальнейшее увеличение их количества практически не повышает описываемую дисперсию.

Таблица 4

Зависимость описанной дисперсии от количества использованных ГК

Количество ГК	Описываемая дисперсия, %
1	91,009397
2	99,993659
3	99,997656
4	99,999389
5	99,999920
6	99,999986
7	99,999996
8	99,999999
9	≈100

На рис. 2 показано пространство главных компонент Z_1 и Z_2 , где каждая точка является проекцией одной из исходных ДХН.

Таким образом, применение проекционного подхода позволяет снижать раз-

мерность анализируемой измерительной информации, при этом сохраняя значимую составляющую данных и отбрасывая случайные помехи и возможные случайные составляющие погрешности измерений.

Результаты работы получены при поддержке проекта № 1.2690.2014/К «Методы решения обратных задач диагностики сложных систем (в технике и медицине) на основе натурно-модельного эксперимента», выполняемого в рамках проектной части государственного задания с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и энергоэффективное электрооборудование» ЮРГПУ (НПИ).

Список литературы

1. Антонов В.Г., Петров Л.М., Щелкин А.П. Средства измерений магнитных параметров материалов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
2. Болч Б., Хуань К.Д. Многомерные статистические методы для экономики – М.: Статистика, 1979. – 317 с.
3. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока – М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 447с.
4. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972, – 248 с.
5. Ковалев О.Ф. Комбинированные методы моделирования магнитных полей в электромагнитных устройствах. – Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 220 с.
6. Эсбенсен К. Анализ многомерных данных. Избранные главы: пер. с англ. С.В. Кучеряевского; под ред. О.Е. Родионовой. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2003. 157 с.