



УДК 621.313.3

## КЛАСТЕРИЗАЦИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А

## CLUSTERING OF 4A TYPE INDUCTION MOTORS

**Костылев Алексей Васильевич**, заведующий каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Э-207. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru. Тел.: +7(343) 375-45-66

**Савкин Константин Викторович**, магистрант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: savkinkostya@mail.ru. Тел.: +7(982)610-11-25

**Шаманин Дмитрий Павлович**, магистрант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: shamanindp@mail.ru. Тел.: +7(912)646-19-49

**Alexey V. Kostylev**, Head of the department, Department «Electric drives», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19 E-207, Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru. Ph.: +7(343) 375-45-66

**Konstantin V. Savkin**, Master student, Department «Electric drives», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Yekaterinburg, Russia. E-mail: savkinkostya@mail.ru. Ph.: +7(982)610-11-25

**Dmitry P. Shamanin**, Master student, Department «Electric drives», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Yekaterinburg, Russia. E-mail: shamanindp@mail.ru. Ph.: +7(912)646-19-49

**Аннотация:** В данной статье предложен вариант разбиения двигателей серии 4А на кластеры с помощью алгоритма k-means (k – средних). Проведен анализ переходных процессов в контуре тока для двигателей, находящихся в одном кластере, при настройке регулятора тока на центр кластера.

**Abstract:** Method of «4А» type induction motors clustering via k-means algorithm is proposed in this paper. Analysis of transient processes in the current loop for induction motors in one cluster, when the current regulator is tuned to the center of the cluster is carried out.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель; кластеризация; метод k-средних; электропривод; моделирование; переходные процессы.

**Key words:** induction motor; clustering; k-means; electrical drive; simulation; transient response.

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует огромное разнообразие асинхронных двигателей. С точки зрения идентификации параметров было бы гораздо удобнее разбить двигатели на группы, в которых настройка системы управления на усредненные значения не даст ощутимого ухудшения качества регулирования внутри одной группы.

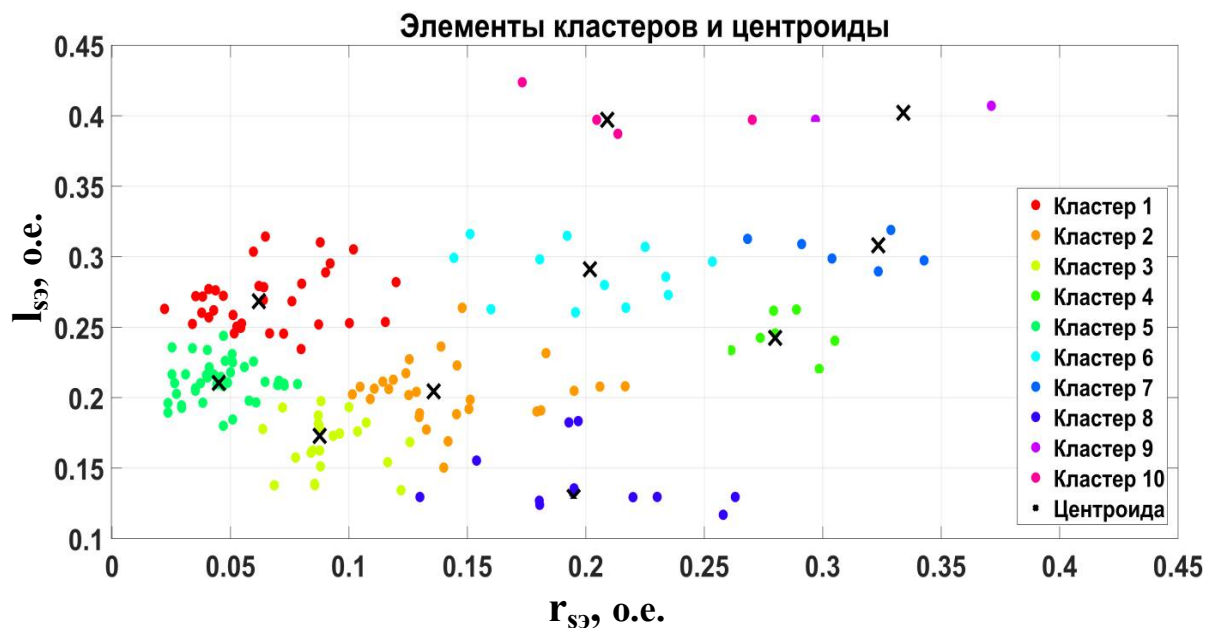
### ОПИСАНИЕ МЕТОДА K-MEANS (K-СРЕДНИХ)

Метод k-средних – наиболее популярный метод кластеризации. В данной статье кластеризация выполнена с помощью инструментов среды Matlab.

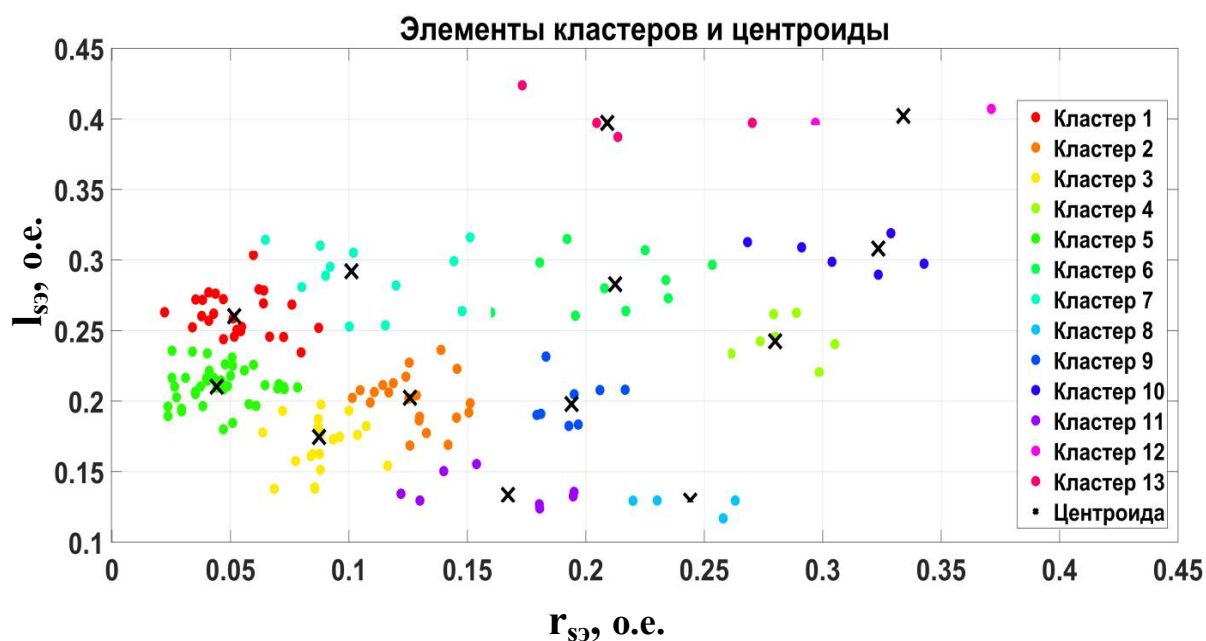
Функция «kmeans» разбивает данные на k

кластеров. Количество кластеров k задается пользователем. Функция «kmeans» рассматривает каждую точку в наборе данных, как объект, расположенный в пространстве. Она находит разбиение, при котором объекты внутри каждого кластера максимально приближены друг к другу, и максимально отдалены от объектов в других кластерах, насколько это возможно. Другими словами действие алгоритма таково, что он стремится минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров этих кластеров.

Каждый кластер определяется его объектами и его центроидой, или центром. Центроида – это точка, до которой минимизирована сумма расстояний от всех объектов в этом кластере.



а)



б)

Рис. 1. Разбиение на а) 10 и б) 13 кластеров

**ФОРМИРОВАНИЕ КЛАСТЕРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А**

В данной статье основой для кластеризации служат параметры схемы замещения в относительных единицах асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А. Таких параметров пять:  $r_s$  – активное сопротивление обмотки статора,  $l_{сэ}$  – индуктивность рассеяния обмотки статора,  $r_r$  – активное сопротивление обмотки ротора,  $l_{рэ}$  – индуктивность рассеяния обмотки ротора,  $l_{mN}$  – номинальная индуктивность намагничивания.

Для возможности визуализации полученных кластеров перейдем от пяти переменных к двум, для вычисления которых используются описанные выше параметры.

$$r_{сэ} = r_s + k_r^2 r_r, \tag{1}$$

$$l_{сэ} = l_s + k_r l_{рэ}, \tag{2}$$

$$k_r = \frac{l_{mN}}{l_{mN} + l_{рэ}}. \tag{3}$$

где  $r_{сэ}$  – эквивалентное значение активного сопротивления фазы двигателя,  $l_{сэ}$  – эквивалентное

значение индуктивности фазы двигателя,  $k_r$  – коэффициент связи ротора. Переход к двум переменным дает возможность построить точки на плоскости в координатах  $r_{s3}, I_{s3}$ .

В данной статье рассмотрено разбиение на 10 и 13 кластеров. Пример результата кластеризации приведен на рис. 1. Черными крестами выделены центры кластеров.

**АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Сопоставив полученные данные, следует отметить, что группы, лидирующие по количеству двигателей в основном обладают высокой мощностью. С другой стороны, группы двигателей, более отдаленных от начала координат обладают сильным разбросом относительно своего центра и представляют двигатели в основном малой мощности.

**СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА КОНТУРА ТОКА**

В соответствии с общими принципами проектирования систем подчиненного регулирования (СПР), структура регулирующей части системы автоматического регулирования (САР) тока выглядит, как представлено на рис. 2.

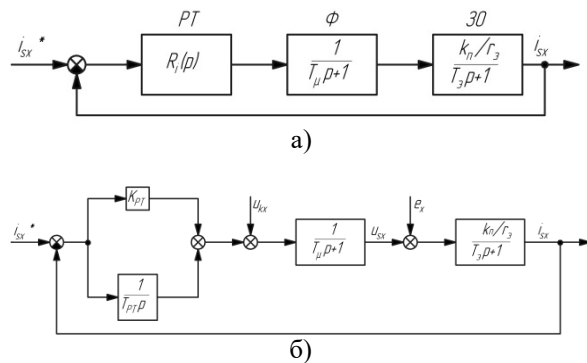


Рис. 2. Структурная схема САР тока (а) Структурная схема одного канала САР тока статора (б)

В соответствии с типовой методикой синтеза регуляторов обеспечивающих настройку на модульный оптимум передаточная функция регулятора имеет вид:

$$R_{i_{x,y}}(p) = k_{PT} + \frac{1}{T_{PT}p}, \tag{4}$$

В этой формуле коэффициент усиления  $k_{PT}$  и постоянная времени регулятора тока  $T_{PT}$  определяются по следующим формулам:

$$k_{PT} = \frac{r_{s3}T_3}{T_i}, \tag{5}$$

$$T_{PT} = \frac{T_i}{r_{s3}}. \tag{6}$$

Некомпенсированная постоянная времени принята:  $T_\mu = 0,01$  с.

**ПОСТРОЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ И ПРОВЕРКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА**

Как говорилось ранее, идея заключается в настройке системы управления на некое среднее значение. В данном случае настройка контура тока выполняется исходя из значений параметров схемы замещения, которые соответствуют центру того кластера, которому принадлежит двигатель.

В качестве примера на рис. 3 представлены переходные процессы контура тока двигателей, принадлежащих конкретному кластеру, переходный процесс при настройке регулятора на параметры центроиды (утолщенная синяя линия) и переходные процессы при отклонении параметров объекта на  $\pm 10\%$  по  $I_3$  и  $\pm 20\%$  по  $r_3$  (утолщенные красные линии). Последние показывают допустимые пределы для переходных процессов. Другими словами, нежелательно, чтобы кривые переходных процессов выходили за красные линии.

На рис. 3а все кривые переходных процессов лежат в допустимой области. На рис. 3б некоторые кривые переходных процессов выходят за допустимую область.

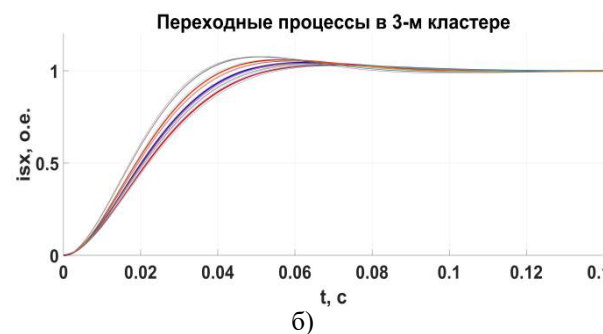
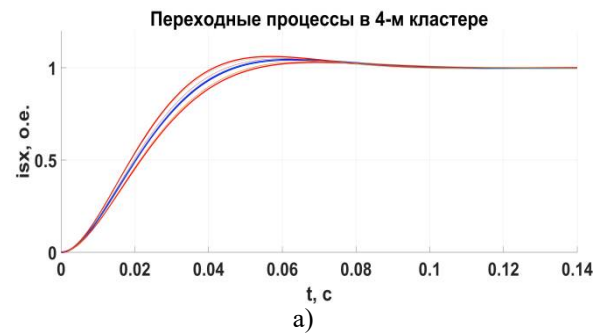


Рис. 3. Переходные процессы в контуре тока в четвертом кластере (а) и третьем кластере (б) при разбиении на 10 кластеров

В данной работе влияние перекрестных связей в двигателях не учитывается.

Для оценки качества регулирования был использован интегральный показатель качества. Для каждого переходного процесса контура тока был посчитан интегральный показатель, после чего был выполнен его пересчет в процентное отклонение от значения показателя для процесса, настроенного на модульный оптимум.

Рис. 4 демонстрирует отклонение показателей качества переходного процесса каждого двигателя. Вертикальными линиями показаны допустимые отклонения параметров двигателя от их начальных значений. Диаграмма (Рис. 5а) показывает, что практически все двигатели выбранного кластера не превышают допустимое отклонение, что свидетельствует о незначительном ухудшении качества регулирования контура тока.

С другой стороны, имеются кластеры, например 3-й (Рис. 4б), показатели которых существенно превышают допустимые отклонения.

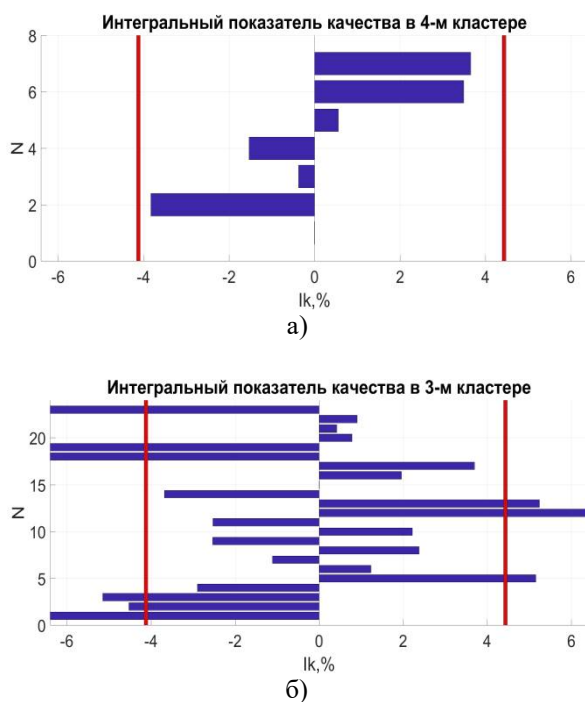


Рис. 4. Процентное отклонение интегрального показателя качества от модульного оптимума для 4-го кластера (а) и 3-го кластера (б) при разбиении всех двигателей на 10 кластеров

Интегральный показатель качества для каждого переходного процесса рассчитывается по следующей формуле (7)[7]:

$$J_k = \int_0^{\infty} (x^2 + T^2 \cdot x'^2) dt \quad (7)$$

Переменная  $x$  является ошибкой от заданного значения в контуре тока. Поскольку настройка

контура ведется на модульный оптимум, в переменную  $T$  подставляется значение  $T_{\mu}$ . Формула (7) учитывает не только отклонение от заданного значение, но и ее производную, а именно в данном эксперименте – производную тока. Такой подход позволяет более точно отразить различие переходных процессов.

Для того, чтобы уменьшить количество тех двигателей, которые превышают допустимые отклонения, необходимо увеличить количество кластеров. Причем, так как в качестве допустимых пределов выбрано отклонение параметров объекта на  $\pm 10\%$  по  $l_3$  и  $\pm 20\%$  по  $r_3$ , необходимо учесть, что допустимая область в зоне малых  $l_3$  и  $r_3$  меньше, чем в зоне больших  $l_3$  и  $r_3$ . Поэтому желательно, в зоне малых  $l_3$  и  $r_3$  разбивать на кластеры меньшего размера.

Для примера на рисунках 5 и 6 представлены соответственно переходные процессы и диаграммы показателей качества для конкретных кластеров при разбиении тех же двигателей на 13 кластеров.

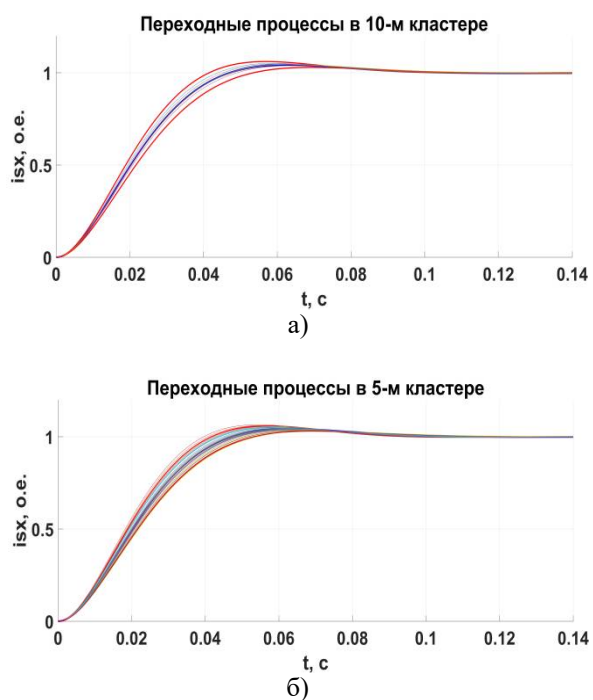


Рис. 5. Переходные процессы в контуре тока в десятом кластере (а) и пятом кластере (б) при разбиении на 13 кластеров

Рисунок 6б показывает, что даже при разбиении на 13 кластеров имеются двигатели, интегральные показатели качества которых превышают допустимые отклонения.

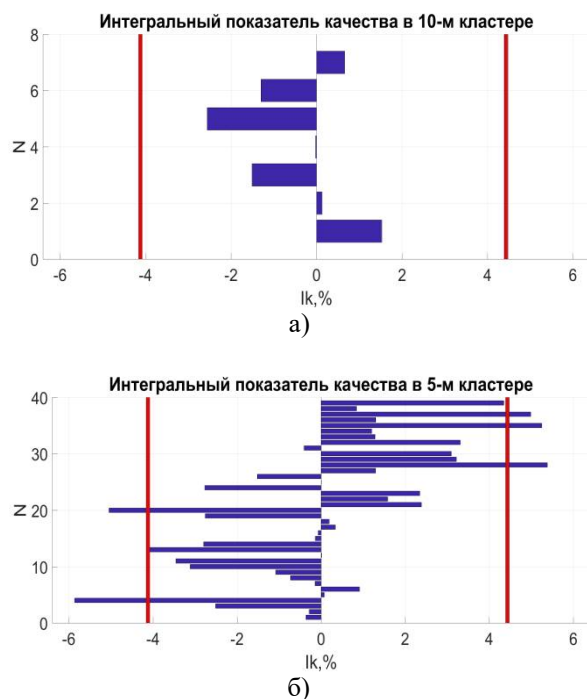


Рис. 6. Процентное отклонение интегрального показателя качества от модульного оптимума для 10-го кластера (а) и 5-го кластера (б) при разбиении всех двигателей на 10 кластеров

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании двигатели серии 4А были распределены на группы (кластеры) по эквивалентным параметрам схемы замещения. С целью проверки качества были построены переходные процессы контура тока для каждого двигателя, регуляторы которых настроены на параметры центроиды. Для оценки качества регулирования использовался интегральный показатель качества.

Оценивая полученные данные следует отметить, что при увеличении количества кластеров уменьшается количество двигателей, качество которых превышает допустимое отклонение.

В последующих работах планируется найти оптимальное разбиение данных двигателей на кластеры. Для реализации этой задачи, в первую очередь, актуален поиск оптимального числа кластеров, а также применение различных современных алгоритмов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф и др. «Асинхронные двигатели серии 4А», справочник, - М.: Энергоиздат, 1982, 504с.
2. Р.Т. Шрейнер «Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления», Ек.: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т» 2008, 361с.
3. Герман-Галкин С.Г. «Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB», - СПб.: Корона, 2001, 320с.
4. Р.Т. Шрейнер «Системы подчиненного регулирования электроприводов» Ек.: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т» 2008, 279с.
5. Г.Г. Соколовский «Электроприводы переменного тока с частотным регулированием», Мск.: Academia 2006, 265с.
6. Р.Т. Шрейнер «Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты», Ек.: УРО РАН, 2000, 654с.
7. В.А. Бесекерский «Теория систем автоматического управления», уч. издание, - СПб.: Издательство «Профессия», 2003, 747с.
8. Kaufman L., and P. J. Rousseeuw. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
9. Arthur, David, and Sergi Vassilvitskii. "K-means++: The Advantages of Careful Seeding." SODA '07: Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. 2007, pp. 1027–1035.
10. Lloyd, Stuart P. "Least Squares Quantization in PCM." IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 28, 1982, pp. 129–137.