

металло-волоконистой капиллярно-пористой структуры влияет большое количество факторов. К числу наиболее значимых можно отнести пористость, диаметр волокон и температурные условия. Применительно к условиям работы высокотемпературных тепловых труб ($t > 500$ °C), когда в виде теплоносителя используются жидкие металлы, необходимо применять капиллярную структуру с волокнами 30 мкм и выше. Потому что в условиях высокотемпературной эксплуатации более подвержены разрушению будут структуры с диаметром волокон 8 мкм. В низкотемпературных тепловых трубах (-70 °C $> t > +250$ °C) применение капиллярных структур с меньшим диаметром волокон более оправдано.

Литература

1. Кравец, В. Ю. Исследование взаимодействия паровых пучков с капиллярной структурой [Текст] / В. Ю. Кравец // Технологические системы. — 2002, — № 2(13). — С. 152–155.
2. Kravets, V. Yu. Experimental Studies of Heat-Transfer Characteristics of Miniaturized Heat Pipes [Текст] / V. Yu. Kravets, Yu. E. Nikolaenko, Ya. V. Nekrashevich // Heat Transfer Research. — 2007. — Vol. 38. — № 6. — pp. 553–563.
3. Косторнов, А. Г. Проницаемые металлические волокновые материалы [Текст] / А. Г. Косторнов. — К. : Техніка, 1983. — 128 с.
4. Косторнов, А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. Том 2 [Текст] / А. Г. Косторнов. — К. : Наукова думка, 2003. — 550 с.
5. Семена, М. Г. Тепловые трубы с металловолоконистыми капиллярными структурами [Текст] / М. Г. Семена, А. Н. Гершуни, В. К. Зарипов. — К. : Вища шк., 1984. — 215 с.
6. Белов, С. В. Пористые металлы в машиностроении [Текст] / С. В. Белов. — М. : Машиностроение, 1981. — 247 с.
7. Косторнов, А. Г. Контактные явления в пористых волоконных материалах [Текст] / А. Г. Косторнов, Л. Г. Галстян // Порошковая металлургия. — 1983. — № 5. — С. 58–61.
8. Пористые проницаемые материалы: Справ. Изд. [Текст] / под ред. Белова С. В. — М. : Металлургия, 1987. — 335 с.
9. Сопротивление материалов [Текст] / Г. С. Писаренко, В. А. Агарев, А. Л. Квитка и др. — К. : Техніка, 1967. — 791 с.
10. Baturkin, V. Study of Structural and Mechanical Properties of Metal Felt Wicks Intended for High Temperature Heat Pipes — Solar Receivers [Текст] / V. Baturkin, V. Kravetz, A. Nischik, V. Zaripov, J. Moreno // 12th International Heat Pipe Conference, May 19–24, 2002, Moscow — Kostroma — Moscow, pp. 547–552.

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КАПІЛЯРНИХ СТРУКТУР СТОСОВНО К УМОВАМ ФУНКЦІОНУВАННЯ В ТЕПЛОВИХ ТРУБАХ

Представлені результати дослідження механічних навантажень металоволокненої капиллярно-пористої структури з нержавіючої сталі в діапазоні пористості від 88 до 99 %. Досліджувались на розрив зразки з діаметрами волокон 8 мкм і 30 мкм. Показано, що на міцність капиллярної структури впливають як пористість і діаметр волокон структури, так і температурний діапазон роботи в теплових трубах.

Ключові слова: капиллярна структура, границя міцності, границя пропорційності, теплова труба.

Кравец Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», e-mail: kravetz_kpi@ukr.net.

Кравец Дмитрий Владимирович, научный сотрудник, Институт спецтехники и экспертизы СБУ, e-mail: kravetz_kpi@ukr.net

Кравец Володимир Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра атомних електростанцій і інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

Кравец Дмитро Володимирович, науковий співробітник, Інститут спецтехніки і експертизи СБУ

Kravets Volodymyr, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», e-mail: kravetz_kpi@ukr.net.

Kravets Dmitry, Institute of Specialized Equipment and Expertise of Security Service of Ukraine, e-mail: kravetz_kpi@ukr.net

УДК 004.891.3+004.93.11

**Кузнецов Д. И.,
Купин А. И.**

АНАЛИЗ И СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА РАСПОЗНАВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОСЕТИ

В статье рассмотрена задача повышения качества диагностирования электрооборудования на основе спектр-токового анализа. Рассмотрена проблема уменьшения влияния шума на процесс диагностики. Предложен и релизован программно частотный фильтр-маска для решения задачи идентификации электрооборудования в условиях современных электросетей с целью дальнейшей диагностики.

Ключевые слова: высшая гармоника, нейронная сеть, программный фильтр, идентификация.

1. Введение

На сегодняшний день крупнейшими потребителями электроэнергии, среди всего электрооборудования, являются электродвигатели. Их доля потребления от выработанной электроэнергии, согласно последним

исследованиям, примерно составляет 75 % [1]. Как и в любом электрооборудовании, в электродвигателях в процессе эксплуатации могут возникать различного рода дефекты, например, повреждение ротора или статора, которые могут привести к тяжелым последствиям, таким как выход из строя самого электродвигателя или

остановку технологического процесса. В силу своей популярности, оптимальному использованию АД препятствует их высокая степень повреждаемости, потому что АД рассчитываются на срок службы 10–15 лет без капитального ремонта при условии их правильной эксплуатации [1, 2].

Поэтому актуальной задачей является создание процесса автоматизации диагностирования АД в рабочем режиме, что в свою очередь может привести к снижению уровня повреждаемости электродвигателей путем раннего выявления дефектов.

2. Анализ исследований и публикаций

Перспективным методом проверки технического состояния электродвигателей является спектр-токовый анализ [1], в основе которого лежит анализ спектрального шума, создаваемого этими электродвигателями.

Главной задачей при диагностике электрооборудования является его идентификация на фоне помех, создаваемых другим электрооборудованием или шумами самой электросети. Задачи идентификации и диагностики электродвигателей, решаемые при спектр-токовом методе, относятся к задачам классификации и распознавания образов. Одним из наиболее распространенных способов распознавания образов является использование аппарата нейронных сетей. Под идентификацией следует понимать запоминание и распознавание характерного следа электродвигателя (спектрального шума) в электросети с помощью нейронной сети.

В современных условиях характеристики входного напряжения не идеальны, а именно, все время встречаются просадки (15–20 %) и скачки (15–20 %) напряжения [2], которые могут существенно видоизменять спектральный шум двигателя (изменение значения амплитуд частот, которые выбираются в роли анализируемых в процессе работы АД), что в свою очередь усложняет процесс диагностирования электродвигателя. При решении задачи идентификации электрооборудования, в основе которой лежит спектральная диагностика сигнала, представленного в виде потребляемого оборудованием тока, главной проблемой является выделение и определение полезного сигнала. Спектральная характеристика получается в результате использования быстрого дискретного преобразования Фурье.

Целью исследований было создание частотного фильтра, который способен отделять среди совокупности сигналов полезный сигнал, даже если частоты шума и полезного сигнала совпадают.

3. Анализ существующих фильтров

Нейронные сети, в силу своего свойства пониженной чувствительности к шумам, не могут выступать в качестве хорошего фильтра полезного сигнала. В основе решения задачи идентификации электрооборудования лежит спектральная диагностика сигнала, представленного в виде потребляемого оборудованием тока. При этом, главной проблемой является выделение и определение полезного сигнала. Поэтому необходимо использовать дополнительные фильтры сигнала.

Под полезным сигналом следует понимать амплитуды высших гармоник, которые создает электрооборудование в электросети и избранные в качестве основных

частот частоты, на которых находятся значения данных амплитуд (см. рис. 1). Под шумом следует понимать все гармоники, присутствующие в электросети и не относящиеся к данному электродвигателю, т. е. гармоники, не выбранные в качестве основных частот. Под основными частотами следует подразумевать частоты, которые имеют наибольшую амплитуду сигнала, и которые выбираются в качестве обучающегося множества для нейронной сети.

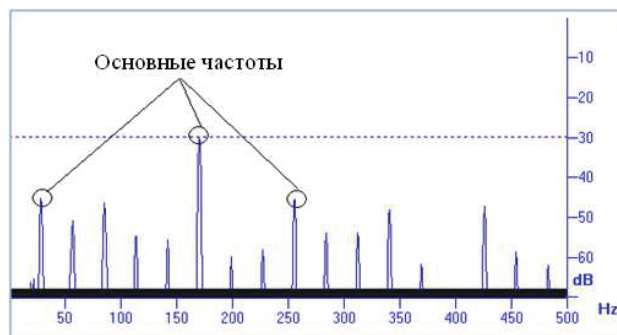


Рис. 1. Пример спектра входного сигнала

Из полученного примера спектра (рис. 1) видно, что частоты, относящиеся к шуму, по своему значению амплитуд отличаются от амплитуд основных частот в среднем на 2...4 дБ, что может привести к ситуации неправильного определения основных частот. Поэтому необходимо использовать фильтрацию полученного сигнала с целью ослабления составляющей шума в спектре входного сигнала.

Так как на одном из этапов работы системы поддержки принятых решений (СППР) является запоминание и идентификация электрооборудования, в электросети может находиться одновременно несколько исследуемых объектов (электродвигателей), то использование физических цифровых фильтров (частотно-выборочные устройства, изменяющие спектральный состав сигнала) недопустимо. Так как процесс запоминания электрооборудования в данный момент времени возможен только с одним объектом, а использование частотно-избирательных устройств фильтров может привести к невозможности отслеживания некоторого из исследуемых объектов [3], предложено использовать программные фильтры.

На сегодняшний день в основе большинства программных фильтров лежит спектральный анализ, и в зависимости от типа АЧХ различают следующие фильтры [4]:

- фильтры нижних частот;
- фильтры верхних частот;
- полосовые фильтры;
- режекторные фильтры.

Так как для получения спектра сигнала используется быстрое преобразование Фурье, то можно использовать оконные функции сглаживания сигнала в качестве программной фильтрации сигнала [5]. В общем случае, процесс фильтрации сигнала имеет следующий вид:

$$s(t) = s_0(t) * w(t), \quad (1)$$

где $s_0(t)$ – неотфильтрованный сигнал, $w(t)$ – функция окна.

К наиболее распространенным оконным функциям относят: прямоугольное, синус окно, окно Барлет, окно Ханна и др.

Определение оптимального фильтра было выполнено экспериментально, путем подключения электродвигателя к «идеальной сети» и определение спектрального шума. Под идеальной электросетью следует понимать сеть, в которой отсутствует влияние другого электрооборудования или других негативных факторов, что повлечет возникновение дополнительного шума, например, используя автономный источник электроэнергии (электрогенератор, аккумулятор). Кроме того, значение коэффициента несинусоидальности не должно превышать 5 %. В общем случае, схема подключения электрооборудования и снятия сигнала представлена на рис. 2.

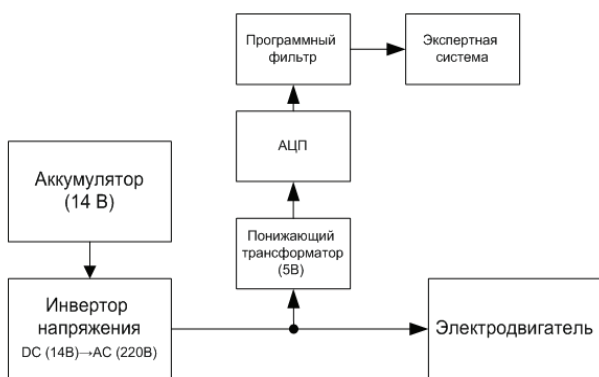


Рис. 2. Схема подключения электрооборудования

В качестве опытного образца был выбран однофазный асинхронный электродвигатель переменного тока 220 В мощностью 1 кВт, частота дискретизации АЦП входного сигнала составляла 44,1 kHz. Критериями качества фильтрации было отношение сигнал/шум и величина сигнала характерной частоты электродвигателя.

Отношение сигнал/шум рассчитывалось как отношение мощности полученного сигнала в целом к значению среднеквадратической ошибки [6]:

$$q = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - M_0)^2} - 1 \right), \quad (2)$$

где M_0 – математическое ожидание, X – спектральный шум, N – количество элементов выборки.

В качестве окон сглаживаний были выбраны следующие:

прямоугольное окно:

$$w(n) = 1; \quad (3)$$

окно Блэкмана:

$$w(n) = 0,42 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0,08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right); \quad (4)$$

окно Хана:

$$w(n) = 0,5 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right); \quad (5)$$

окно Гаусса:

$$w(n) = \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{n - \frac{N-1}{2}}{\sigma \frac{N-1}{2}}\right)^2\right); \quad (6)$$

окно Хеминга:

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right); \quad (7)$$

окно Кайзера:

$$w(n) = \frac{I_0(\beta(1 - (n - \alpha)/\alpha)^2)^{0,5}}{I_0(\beta)}; \quad (8)$$

где I_0 – модифицированная функция Бесселя, $\alpha = N/2$ коэффициент ослабления, n – соответствующий элемент выборки, N – общее количество элементов выборки, σ – дисперсия, β – коэффициент ослабления.

Также был протестирован фильтр Калмана, позволяющий минимизировать шумы в полученном сигнале в соответствии с заданной априорной информацией об исследуемой системе [7]. С целью упрощения вычислений предположим, что состояние системы (состояние электрооборудования) зависит от одного вектора значений амплитуд на соответствующей частоте. Для фильтрации полученного сигнала использовались следующие зависимости:

1. Предсказание состояния системы:

$$x_k^- = Fx_{k-1} + Bu_{k-1}. \quad (9)$$

2. Предсказание погрешности ковариации:

$$P_k^- = FP_{k-1}F^T + Q. \quad (10)$$

3. Вычисление усиления Калмана:

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}. \quad (11)$$

4. Обновление оценки с учетом измерений z_k :

$$x_k = x_k^- + K_k(z_k - Hx_k^-). \quad (12)$$

Обновление погрешности ковариации:

$$P_k = (I - K_k H)P_k^-, \quad (13)$$

где F – матрица перехода между состояниями, B – матрица применения управляющего воздействия, P_k – погрешность ковариации, H – матрица измерений, R – ковариация шума измерений, Z_k – измерение в текущий момент времени, Q – ковариация шума процесса, u_{k-1} – управляющее воздействие в прошлый момент времени, I – матрица идентичности.

При использовании фильтра были установлены следующие значения переменных, которые определяют динамику системы и измерений:

1. Значения матрицы динамики системы было принято $F = 1$, так как будем считать, что электрооборудование все время работает в исправном состоянии, т. е. предсказанное значение равно предыдущему.

2. Значения матрицы управляющего воздействия было принято $B = 0$, так как нет информации о возможных факторах влияния на работу оборудования за время дискретизации (перепады напряжения, перегрузки и др.).

3. Погрешность измерений $R = 15$ и шум процесса $Q = 2$ были получены эмпирическим путем (экспериментально).

Результаты тестирования представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, наибольшего усиления, в соответствии с критерием сигнал/шум, дает окно Гаусса 52 dB, а наименьшее — прямоугольное окно 36 dB. Вместе с этим, согласно критерию, значение характерной частоты наибольшее усиление дает фильтр Калмана, а наименьшее — окно Гаусса.

С целью определения оптимального фильтра, был рассчитан относительный прирост значения характерной частоты χ :

$$\chi = \frac{q}{\max A_i}, \tag{14}$$

где q — отношение сигнал/шум, $\max A_i$ — характерная частота, $i = \{1..n\}$.

Как видно, оптимальным фильтром является фильтр Калмана, а худшим — окно Блэкмана.

В случае подключения АД к промышленной, а не к идеальной сети, главной проблемой являются высшие гармоники, создаваемые другими АД, что в свою очередь не позволяет пользоваться стандартными типами цифровых фильтров, ведь величина шума может быть намного больше, чем величина полезного сигнала.

Таблица 1

Результаты тестирования цифровых фильтров

№ п/п	Название фильтра	Сигнал/шум, dB	Значение характерной частоты, dB	Относительный прирост значения характерной частоты, χ
1.	Без фильтра	35	-34	1,029
2.	Прямоугольное окно	36	-35	1,0285
3.	Окно Блэкмана	43	-56	0,767
4.	Окно Хана	36	-32	1,125
5.	Окно Гаусса	52	-60	0,866
6.	Окно Хеминга	38	-40	0,950
7.	Окно Кайзера	33	-34	0,970
8.	Фильтр Калмана	43	-32	1,343

Ситуация, когда частоты шума и полезного сигнала совпадают, может привести к неправильному распознаванию дефектов электрооборудования (рис. 3).

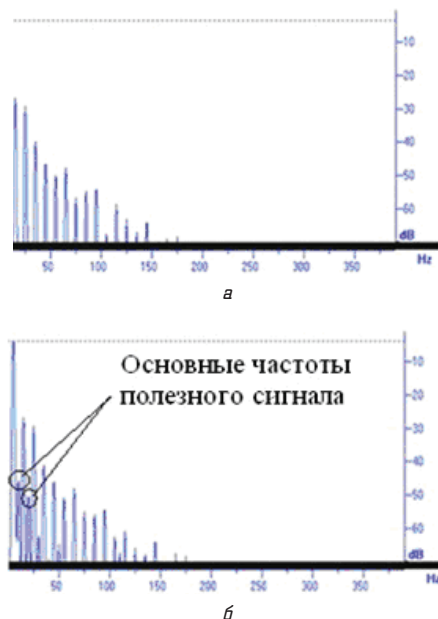


Рис. 3. Пример спектра входного сигнала: а — спектр шумов; б — спектр шума и полезного сигнала

4. Использование фильтра-маски

В случае промышленной сети основными недостатками использования рассмотренных фильтров является невозможность выделения полезного сигнала в результате наложения частот двух объектов. Поэтому было предложено использовать фильтрацию полезного сигнала путем использования фильтра-маски. Т. е. если входной сигнал $Z_{вх}(f)$, в котором на данный момент нет полезного сигнала, а только частоты гармоник, создаваемых другим неисследуемым электрооборудованием, электросетью и т. д., то фильтр-маска (далее маска) примет значение $Z_m(f) = Z_{вх}(f)$. Когда в электросети включается электрооборудование, определение полезного сигнала происходит следующим образом:

$$Z_{вых}(f) = Z_{вх}(f) - Z_m(f) * k, \tag{15}$$

где k — коэффициент «маскировки» шума, который необходимо использовать для корректировки фильтрации, так как амплитудная величина шума имеет динамический характер.

В случае одновременного мониторинга нескольких объектов и необходимости анализа каждого по отдельности, в некоторые моменты времени можно создавать маски для каждого из них. Тогда определение полезного сигнала будет происходить следующим образом:

$$Z_{вых}(f)_k = Z_{вх}(f) - \left(\sum_{i=1}^{k-1} Z_m(f)_i + \sum_{i=k+1}^n Z_m(f)_i \right) * k, \tag{16}$$

где $Z_m(f)_i$ — полезные сигналы неисследуемых объектов, $Z_m(f)_k$ — полезный сигнал исследуемого в конкретный момент времени к текущему моменту.

Результаты тестирования представлено на рис. 4. Частотный фильтр был реализован в среде Delphi 7. На рис. 4,а представлен неотфильтрованный сигнал, а на рис. 4,б — отфильтрованный сигнал.

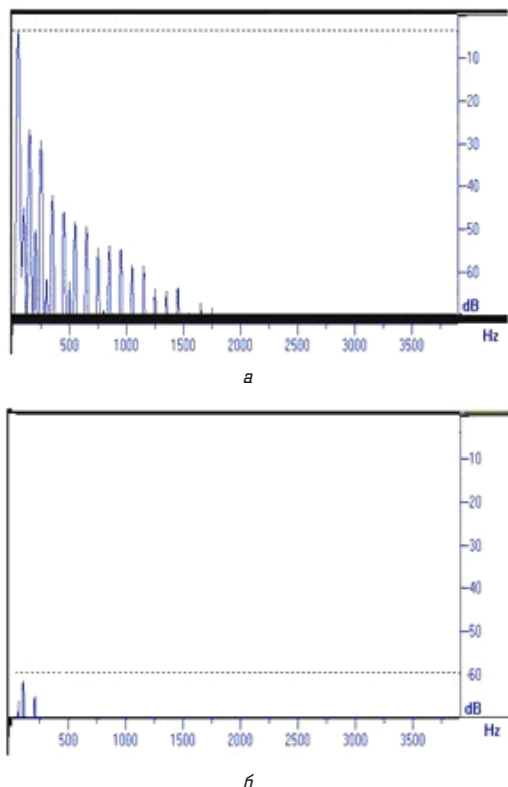


Рис. 4. Пример работы частотного фильтра: *a* — неотфильтрованный сигнал; *b* — отфильтрованный сигнал

В дальнейшем, полученный сигнал можно усилить для получения полной спектральной характеристики электрооборудования путем использования каскада фильтров. Используя коэффициент маскировки k , можно найти «золотую середину», т. е. определение наиболее точной спектральной характеристики электродвигателя.

5. Заключение

Использование программного фильтра позволяет при наличии нескольких включенных объектов к электросети исследовать электродвигатели по отдельности, используя для каждого свою маску.

Предложенный фильтр-маска дает возможность отделять полезный сигнал от шума, даже если они совпадают по частотам.

Использование в паре программного фильтра Калмана и предложенного фильтра-маски, путем усиления слабого сигнала и маскировки наложенного сигнала шума на полезный сигнал, позволит достичь наилучшего качества фильтрации.

Недостатком использования предложенного фильтра является то, что при больших значениях k (для каждого типа АД определяется экспериментально), данный фильтр будет представлять собой фильтр низких частот.

Литература

1. Петухов, В. С. Диагностика состояния электродвигателей на основе спектрального анализа потребляемого тока [Текст] / В. С. Петухов, В. А. Соколов // Журнал «Новости Электротехники». — Москва, 2005. — № 1(31). — С. 23.

2. Кравченко, В. М. Техническое диагностирование механического оборудования [Текст] / В. М. Кравченко, В. А. Сидоров. — Донецк : 2006. — 256 с.
3. Фильтрация языка [Электронный ресурс] / Музычный компьютер. — Режим доступа: <http://www.petelin.ru/vsmag/galaxy/galaxy.htm> (дата обращения: 12.11.2012).
4. Didier G. Fault detection of broken rotor bars in induction motor using a global fault index / G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2006. — vol. 42, pp. 79–88.
5. Воскобойников, Ю. Е. Фильтрация сигналов и изображений: Фурье и вейвлет алгоритмы (с примерами в Mathcad) [Текст] : монография / Ю. Е. Воскобойников, А. В. Гочаков, А. Б. Колкер. — Новосибирск // ИГАСУ, 2010. — 188 с.
6. Попов, В. С. Исследование влияния боковых лепестков спектра окон на погрешности обработки и передачи сигнала [Текст] / В. С. Попов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 203 с.
7. Grewal M. S. Kalman Filtering — Theory and Practice Using MATLAB / M. S. Grewal, A. P. Andrews. — Wiley, 2001. — 167 p.

АНАЛІЗ І ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА РОЗПІЗНАВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

В статті розглянуто задачу підвищення якості діагностування електрообладнання на основі спектр-токового аналізу. Розглянута проблема зменшення впливу шуму на процес діагностики. Запропоновано та реалізовано програмно частотний фільтр-маска для вирішення задачі ідентифікації електрообладнання в умовах сучасних електромереж з метою подальшої діагностики.

Ключові слова: вища гармоніка, нейронна мережа, програмний фільтр, ідентифікація.

Кузнецов Денис Іванович, аспірант, Криворізький національний університет, e-mail: kuznetsov-dennis@yandex.ru.

Купін Андрій Іванович, доктор технічних наук, професор, декан ФІТ, Криворізький національний університет, e-mail: kupin@mail.ru

Кузнецов Денис Іванович, аспірант, Криворізький національний університет.

Купін Андрій Іванович, доктор технічних наук, професор, декан ФІТ, Криворізький національний університет

Kuznetsov Denis, Krivoi Rog National University, e-mail: kuznetsov-dennis@yandex.ru.

Kupin Andrew, Krivoi Rog National University, e-mail: kupin@mail.ru