

Программная реализация алгоритмов диагностирования электрооборудования (на примере анализа характера гармонических колебаний)

А.Е. Колоденкова¹✉, С.С. Верещагина¹

¹ Самарский государственный технический университет,
г. Самара, 443100, Россия

Ссылка для цитирования

Колоденкова А.Е., Верещагина С.С. Программная реализация алгоритмов диагностирования электрооборудования (на примере анализа характера гармонических колебаний) // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 1. С. 62–68. doi: 10.15827/0236-235X.142.062-068

Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.1

Поступила в редакцию: 31.07.2023

После доработки: 11.09.2023

Принята к публикации: 22.09.2023

Аннотация. В статье предлагаются алгоритмы выбора параметров электрооборудования и поиска отклонений значений гармонических колебаний, а также мероприятия по предотвращению неисправностей оборудования для комплексного диагностирования в условиях множества разнородной информации. Алгоритм выбора параметров электрооборудования основан на классификации параметров по характеру и степени их влияния на оборудование с использованием БЗ, содержащей производственные правила о типах и влиянии параметра на оборудование (основной, дополнительный, вспомогательный), а также БД (данные о выходе из строя оборудования, данные с приборов и датчиков). Предлагаемый алгоритм позволяет классифицировать и выбирать наиболее важные диагностические параметры, влияющие на состояние электрооборудования, тем самым отклоняя незначимые параметры без потери информации. Алгоритм поиска отклонений значений гармонических колебаний позволяет определить не только время возникновения отклонения параметра, но и суммарное время отклонения с целью выявления причин возникновения гармонических колебаний. Рассматриваются структура программной системы диагностики электрооборудования с описанием взаимосвязанных модулей, где связующими звеньями являются БД и БЗ, а также экранные формы интерфейса системы. Разработанная программная система позволяет по выбранному типу параметра электрооборудования подбирать методы его диагностирования, мероприятия по предотвращению неисправностей оборудования, обнаруживать неисправность, нестабильность работы оборудования, приводящие к увеличению, например, гармоник напряжения, а также низкое качество электроэнергии. Внедрение на производстве предложенного подхода к диагностированию электрооборудования позволит принять научно обоснованное решение относительно выбора параметров для дальнейшего диагностирования с учетом множества разнотипной информации, провести более глубокое диагностирование и тем самым выявить неисправности в оборудовании.

Ключевые слова: алгоритм выбора параметров, алгоритм поиска отклонений значений гармонических колебаний, база данных, база знаний

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00415

Введение. Одной из слабоструктурированных и плохо формализованных задач при диагностировании *электрооборудования* (ЭО) является оценка его состояния, которая осуществляется по результатам диагностических измерений [1–3]. Это обусловлено большим количеством влияющих на ЭО параметров, отсутствием математических методов получения достоверных решений относительно состояния оборудования по совокупности исходной информации, необходимостью использования информации, полученной от персонала. Повышение точности оценки состояния ЭО возможно, однако при этом возникает ряд проблем, а именно выбор диагностических параметров и первичное диагностирование, включающее поиск отклонений значений параметров [4].

Параметры гармонического колебания оказывают существенное влияние на все виды ЭО и, наоборот, ЭО является источником гармонических колебаний, поэтому целесообразно проводить их анализ. Это приведет к уменьшению числа случаев выхода оборудования из строя, поможет поддерживать его стабильную работу и обеспечит безопасность работы электрических систем [5, 6]. Исследование влияния гармонических колебаний на ЭО является весьма актуальной задачей, для решения которой существует достаточное количество подходов.

Так, в работе [7] рассматриваются оценка гармонического колебания и выбор подходящего индекса оценки. Для повышения точности оценки предлагается метод, основанный на измерении подобия и точках упорядочения для идентификации структуры кластеризации. Индекс всех гармонических составляющих основан на субъективно-аналитическом процессе для упрощения результатов оценки.

В работе [8] описано влияние второй гармонической составляющей на модульные много-

уровневые преобразователи. Предлагается оптимальная схема ввода тока второй гармоники для уменьшения колебаний напряжения на конденсаторе в гибридном многоуровневом преобразователе при сбоях SLG на стороне сети. Разработаны математические модели колебаний мощности как при установившихся режимах, так и при сбоях на стороне сети. При этом отсутствуют исследования по смягчению колебаний напряжения на конденсаторе при сбоях SLG на стороне сети для гибридного многоуровневого преобразователя.

В работе [9] рассматриваются колебания гармонических составляющих от действия импульсных источников питания. Описываются экспериментальные исследования коэффициентов только третьей и пятой гармонических составляющих, которые возникают при работе импульсного преобразователя. Степень влияния высших гармоник на работу ЭО оценивается с помощью двух показателей качества электрической энергии – коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения.

В работе [10] исследуется влияние частотного преобразователя на гармонические составляющие. С помощью прибора «Ресурс-ПКЭ» измеряются значения суммарных гармонических составляющих напряжения и коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения. Приведены экранные формы с отклонениями гармонических колебаний от нормативных значений.

Однако существующие подходы к анализу влияния гармонических колебаний имеют некоторые недостатки. Во-первых, не в полной мере исследуется зависимость влияния гармонических колебаний от ЭО (рассматриваются не все гармонические составляющие); во-вторых, доказательства того, что оборудование влияет на показатели качества электрической энергии, приводятся без выдачи какого-либо перечня мероприятий для снижения степени влияния гармонических колебаний на ЭО; в-третьих, гармонические колебания искусственно разделяют на гармонические составляющие, при этом не учитывается то, что они могут быть различного порядка и влиять друг на друга; в-четвертых, общепринято выделять 40 гармонических составляющих, но для анализа берется лишь часть гармоник, что связано со сложными математическими вычислениями.

Несмотря на большое количество работ, посвященных диагностированию промышлен-

ного оборудования на этапе эксплуатации в условиях множества факторов, проблема влияния гармонических колебаний на ЭО до сих пор остается открытой. Выраженный системный характер данной проблемы определяет необходимость в разработке комплексного подхода к диагностированию ЭО. Новизна описанного в данной работе подхода заключается в комплексном использовании параметров, классифицированных по характеру и степени их влияния на оборудование с использованием БЗ и БД, а также поиска отклонений значений гармонических колебаний с учетом сложных взаимосвязей между ними.

Алгоритм выбора параметров ЭО

Данный алгоритм основан на классификации параметров по характеру и степени влияния на оборудование с использованием БЗ, содержащей производственные правила о типе параметра (основной, дополнительный, вспомогательный) (рис. 1). В алгоритм входит также БД, содержащая данные о выходе из строя оборудования, данные с приборов и датчиков (время между считыванием значений параметров с прибора составляет 3 сек.).

Шаг 1. Выбор вида оборудования, для которого будет осуществляться диагностирование (асинхронные электродвигатели, трансформаторы, насосы, синхронные двигатели и др.).

Шаг 2. Выбор параметров. Оптимальный набор параметров определяется на основе полного анализа электрических, механических, тепловых, вибрационных и других параметров. С одной стороны, это приводит к правильному решению относительно состояния ЭО, более точному и достоверному прогнозу, а с другой, использование большого количества параметров может вызвать снижение эффективности процесса принятия диагностических решений.

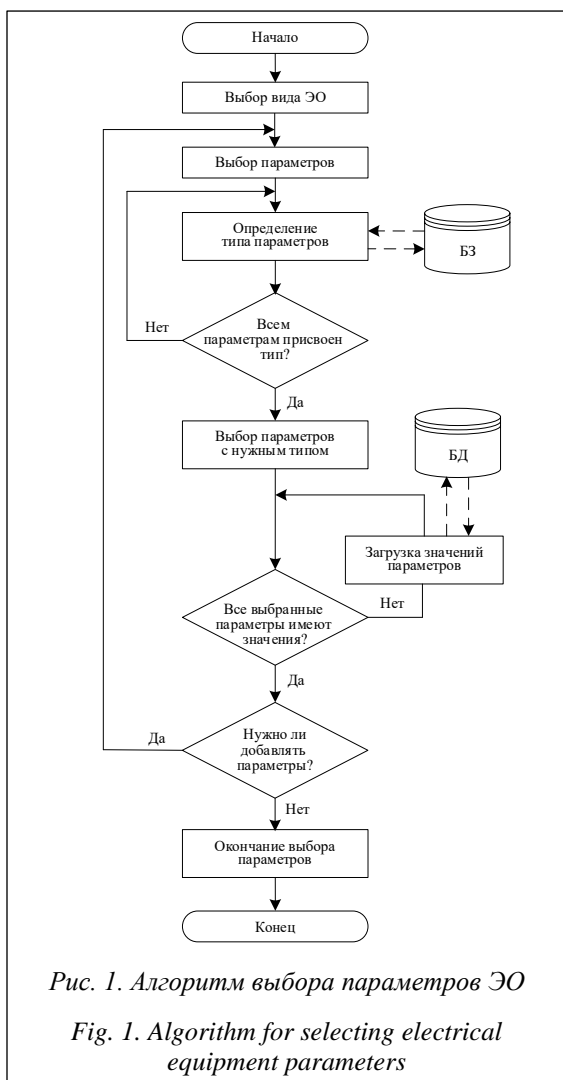
Шаг 3. Определение типа параметров. Для определения типа параметров и их влияния на оборудование используется БЗ, содержащая производственные правила, например:

ЕСЛИ тип оборудования = асинхронный двигатель, ТО напряжение = основной параметр;

ЕСЛИ тип оборудования = синхронный двигатель, ТО напряжение = дополнительный параметр;

ЕСЛИ тип оборудования = асинхронный двигатель, ТО гармоники напряжения = дополнительный параметр.

Производственные правила формируются персоналом на основе опыта, накопленного в пе-



риод диагностирования ЭО. Содержащая производственные правила БЗ проверяется на наличие структурных ошибок (избыточность, цикличность, противоречивость, неполнота). Авторы предлагают классифицировать параметры на основные (класс 1), дополнительные (класс 2) и вспомогательные (класс 3), что связано с их большим количеством и различным влиянием на оборудование. Классификация параметров по оценке характера и степени влияния на оборудование представлена в таблице.

Шаг 4. Если всем выбранным параметрам присвоен тип, то осуществляется переход к шагу 5, иначе – переход к шагу 3.

Шаг 5. Выбор параметров нужного типа. Персонал на своем опыте сам решает, какие параметры и какого типа выбрать для дальнейшего диагностирования оборудования. *Шаг 6.* Если все выбранные параметры имеют значения, то происходит переход к шагу 8, иначе – переход к шагу 7.

Оценка характера и степени влияния параметров на оборудование

Assessing parameter nature and degree of impact on equipment

Вербальное описание	Степень влияния	Тип параметра
[0, 0,3]	Слабое	Вспомогательный (класс 3)
[0,31, 0,7]	Умеренное	Дополнительный (класс 2)
[0,71, 1]	Сильное	Основной (класс 1)

Шаг 7. Загрузка значений параметров осуществляется с использованием БД, хранящей данные о выходе из строя оборудования, данные с приборов и датчиков в формате Excel (*.xls).

Шаг 8. Если для дальнейшего диагностирования нужно добавлять еще параметры (выбранных параметров может быть недостаточно), то осуществляется переход к шагу 2, иначе – переход к шагу 9.

Шаг 9. Окончание выбора параметров. При выборе параметра ЭО может возникнуть следующая ситуация: рассматриваемый параметр несущественно влияет на ЭО, но при этом оказывает сильное влияние на другой параметр, который существенно влияет на работу оборудования и является основным. Тогда рассматриваемый параметр необходимо отнести к дополнительным, поскольку он лишь дополняет основной параметр.

Алгоритм поиска отклонений значений гармонических колебаний

Описываемый алгоритм представлен на рисунке 2. Заметим, что каждое значение номера гармоники должно проверяться на вхождение в предельный интервал. При этом нормально допустимые значения коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения определяются по таблице (ГОСТ 32144-2013). После завершения обработки всех значений n_i гармоники осуществляется переход к следующему порядковому номеру n_{i+1} гармоники с соответствующими ей значениями.

По окончании работы со всеми имеющимися порядками гармоник, предоставленными на исследование, осуществляется анализ отклоненных значений для определения ЭО и его работоспособности. Период времени для ана-

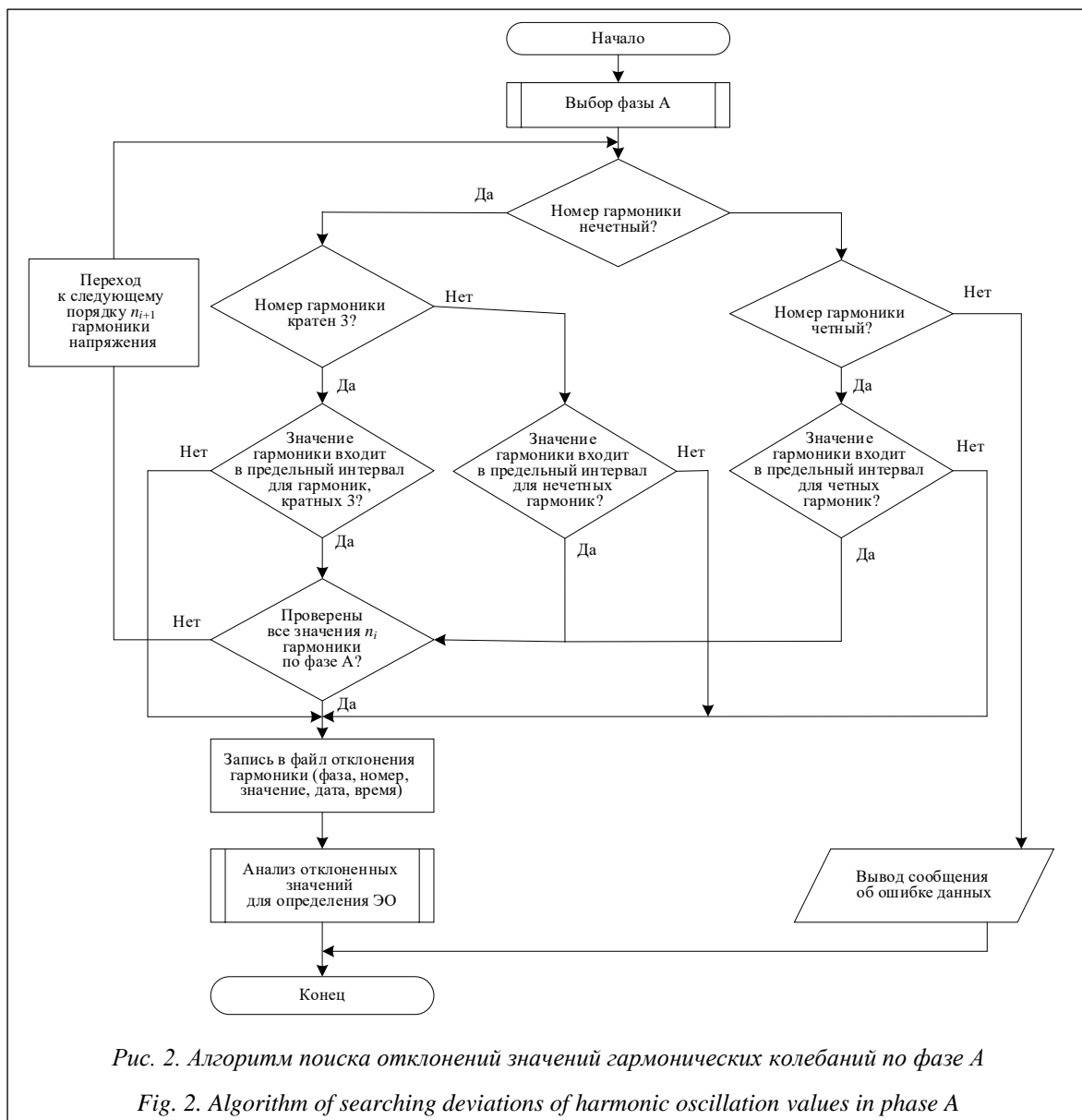


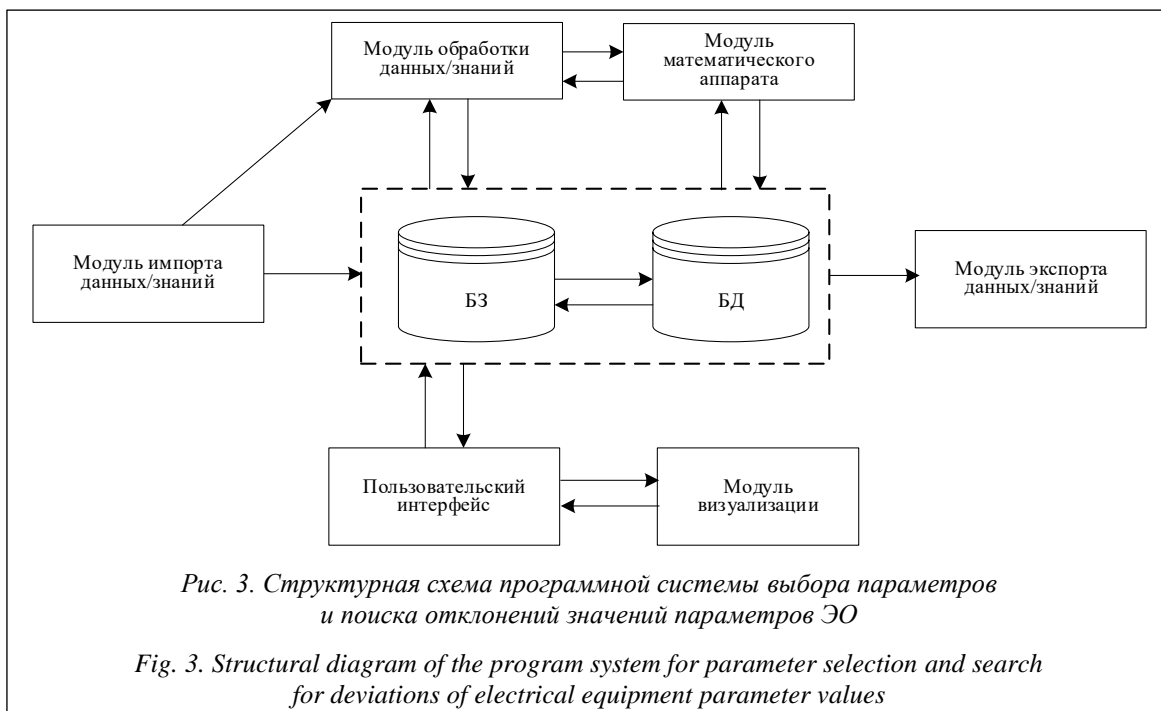
Рис. 2. Алгоритм поиска отклонений значений гармонических колебаний по фазе А
 Fig. 2. Algorithm of searching deviations of harmonic oscillation values in phase A

лиза гармонических колебаний составляет усредненное значение 3 сек. с интервалом в течение 168 часов работы оборудования в штатном режиме. Аналогичный поиск осуществляется для фаз B и C, а также для всех номеров гармоник.

Пример выбора параметров и поиска отклонений значений гармонических колебаний для асинхронного двигателя

Программная система выбора параметров для дальнейшего диагностирования оборудования и поиска отклонений значений гармонических колебаний, ядром которой являются БД и БЗ, состоит из шести модулей (рис. 3). Выделены следующие модули: модуль импорта данных/знаний, отвечающий за их передачу в фор-

мате Excel (*.xlsx) или в виде производционных правил для дальнейшей обработки; модуль обработки данных, позволяющий редактировать (добавлять, удалять) информацию в БД и БЗ, а также осуществлять проверку БЗ на наличие структурных ошибок [11]; модуль математического аппарата, решающий задачи диагностирования и обеспечивающий обработку данных/знаний с помощью предложенных алгоритмов; модуль экспорта данных/знаний, отвечающий за их преобразование в формат Excel (*.xlsx) либо текстовый и передачу; модуль визуализации, осуществляющий представление полученных результатов в текстовом формате; пользовательский интерфейс, представленный в виде главных окон (ввода исходных данных и вывода результатов) программной системы.



Для реализации предложенной программной системы был выбран объектно-ориентированный язык программирования C#.

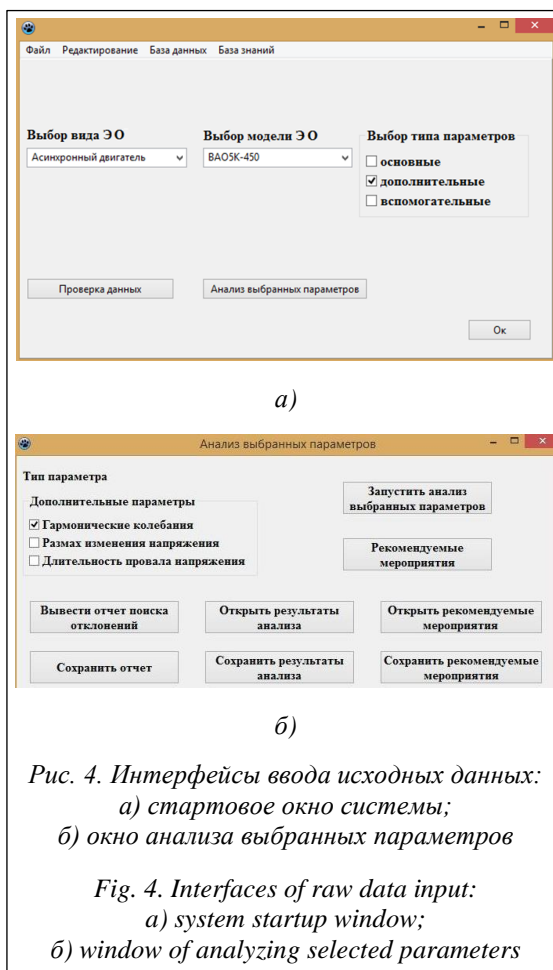
На рисунке 4 показаны интерфейсы ввода исходных данных. Видно, что персонал сам выбирает вид, модель оборудования, а также тип параметра для диагностирования на основе своих знаний и опыта. Далее необходимо кликнуть «Анализ выбранных параметров» (рис. 4а).

Из совокупности всех дополнительных параметров (рис. 4б), влияющих на асинхронный двигатель, персонал выбирает тот, который необходимо проверить на наличие отклонений (в качестве примера выбираются гармонические колебания). Далее нажимается кнопка «Запустить анализ выбранных параметров». Отчет о поиске отклонений, а также результаты анализа сохраняются в формате Excel (*.xlsx), рекомендуемые мероприятия – в текстовом формате txt.

На рисунке 5 представлены результаты поиска отклонений значений гармонических колебаний, цветом выделены выходы значений гармонических колебаний за предельный интервал, которые участвуют в анализе причин их возникновения.

На основании полученных результатов можно порекомендовать следующие мероприятия для асинхронного двигателя ВАО5К-450, 560, необходимые для снижения влияния гармонических колебаний: установка устройств плавного пуска/преобразователей частоты (по согласованию с производителем), установка

фильтрокомпенсирующего устройства, установка сглаживающего фильтра.



Заключение

В результате проведенного исследования была разработана программная система, реализующая алгоритмы выбора параметров и поиска отклонений их значений и позволяющая провести диагностирование ЭО с учетом вида оборудования, характера и степени влияния параметров на него. Разработанная система позволяет, во-первых, на основе классификации выбрать важные параметры для дальнейшего диагностирования, тем самым отсеивая незначимые параметры (снижая размерность факторного пространства) и сокращая временные затраты на построение моделей и применение методов диагностирования, и, во-вторых, вы-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Ku(n) (95%)	0,81	3,04	0,27	5,16	0,5	2,91	0,52	0,08	
3	Ku(n)норм (95%)	2	5	1	6	0,5	5	0,5	0,5	
4	Ku(n) (100%)	0,84	4,06	0,31	5,62	0,5	3,16	0,55	0,59	0,4
5	Ku(n) (100%)	3	7,5	1,5	9	0,75	7,5	0,75	2,25	0,75
6	Ku(n) (95%)	0,41	3,46	0,69	4,52	0,49	2,89	0,28	0,49	0,05
7	Ku(n)норм (95%)	2	5	1	6	0,5	5	0,5	1,5	0,5
8	Ku(n) (100%)	0,62	4,95	0,75	4,92	0,54	3,56	0,3	0,59	0,07
9	Ku(n) (100%)	3	7,5	1,5	9	0,75	7,5	0,75	2,25	0,75
10	Ku(n) (95%)	0,92	4,5	0,55	5,47	0,5	2,61	0,32	0,43	0,08
11	Ku(n)норм (95%)	2	5	1	6	0,5	5	0,5	1,5	0,5
12	Ku(n) (100%)	1,08	5,1	0,6	6,14	0,69	3,27	0,38	0,64	0,09

Рис. 5. Интерфейс вывода результатов поиска отклонений значений гармонических колебаний

Fig. 5. Output interface of the results of searching for deviations of harmonic oscillation values

явить отклонения значений параметров ЭО, которые могут привести к его поломке либо к выходу из строя.

Список литературы

- Jian W., Wenbing Z., Chao G., Demeng B., Kuihua W. The new developed health index for power transformer condition assessment. Proc. ACPEE, 2020, pp. 1880–1884. doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136344.
- Li Z., Sun J., Dong J., Li H., Du F. Train-level fault diagnosis based-on feature selection. Proc. SAFEPROCESS, 2019, pp. 772–775. doi: 10.1109/SAFEPROCESS45799.2019.9213309.
- Qunying Y., Haidan L., Xiaowei L., Kun W., Guozhi Z., Xiaoxing Z. Research on fault diagnosis technology of less-oil immersed electric equipment based on pressure. Proc. CIEEC, 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510186.
- Kolodenkova A., Vereshchagina S. Method for selecting diagnostic parameters using information technologies under a set of various types of information. Proc. ICIEAM, 2023, pp. 916–920. doi: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139048.
- Tabora M.J., de Lima Tostes M.E., de Matos E.O. et al. Voltage harmonic impacts on electric motors: A comparison between IE2, IE3 and IE4 induction motor classes. Energies, 2020, vol. 13, no. 13, pp. 1–18. doi: 10.3390/en13133333.
- Gnacinski P., Muc A., Peplinski M. Influence of voltage subharmonics on line start permanent magnet synchronous motor. IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 164275–164281. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3133279.
- Liu Z., Xu Y., Jiang H., Tao Sh. Study on harmonic impedance estimation and harmonic contribution evaluation index. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 59114–59125. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2982950.
- Xu J., Deng W., Li G., Zhao Ch., Liu Ch. Optimal second-harmonic current injection for capacitor voltage fluctuation reduction in hybrid MMCs under grid-side SLG faults. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, vol. 37, no. 4, pp. 2857–2866. doi: 10.1109/TPWRD.2021.3118690.
- Коренков Д.А., Тимохин В.А. Исследование гармонических искажений напряжения и тока от действия импульсных источников питания // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: мат. междунар. конф. 2022. С. 62–66.
- Антонов А.И., Руди Д.Ю., Хацевский К.В. Исследование качества электроэнергии в электрических сетях с полупроводниковыми преобразователями // Вестн. ЮГУ. 2023. № 1. С. 123–130. doi: 10.18822/byusu202301123-130.
- Kolodenkova A.E., Guda A.N., Vereshchagina S.S., Tuvaeva V.O. Diagnostics of the technical condition of industrial equipment based on a system of hierarchical production rules. In: LNNS. Proc. IITI, 2022, vol. 330, pp. 180–187. doi: 10.1007/978-3-030-87178-9_18.

Software implementation of algorithms for electrical equipment diagnostics (by the example of harmonic oscillation analysis)

Anna E. Kolodenkova ¹✉, Svetlana S. Vereshchagina ¹

¹ Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation

For citation

Kolodenkova, A.E., Vereshchagina, S.S. (2024) ‘Software implementation of algorithms for electrical equipment diagnostics (by the example of harmonic oscillation analysis)’, *Software & Systems*, 37(1), pp. 62–68 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.062-068

Article info

Received: 31.07.2023

After revision: 11.09.2023

Accepted: 22.09.2023

Abstract. The paper proposes an algorithm for selecting electrical equipment parameters, an algorithm for searching deviations of harmonic oscillation values, as well as measures for preventing equipment malfunctions in complex diagnostics under conditions of multiple heterogeneous information. The algorithm for selecting electrical equipment parameters is based on classifying parameters by a character and degree of their impact on the equipment using a knowledge base containing product rules about the types and impact of a parameter on the equipment (basic, additional, auxiliary), as well as a database (equipment failure data, data from devices and sensors). The proposed algorithm allows classifying and selecting the most important diagnostic parameters affecting the state of electrical equipment; thus, it rejects insignificant parameters without information loss. The algorithm for searching deviations of harmonic oscillation values allows not only determining the time of a parameter deviation occurrence, but also the total deviation time in order to identify the causes of harmonic oscillations. The authors consider the structure of the program system of electrical equipment diagnostics with the description of interconnected modules, which have a database, a knowledge base and system interface screen forms as connecting links. The developed software system allows selecting methods of electrical equipment diagnostics, measures to prevent equipment malfunctions according to the selected type of its parameter; detecting malfunction, instability of equipment operation that results in an increase in voltage harmonics, for example, as well as poor power quality. Implementing the proposed approach to diagnostics of electrical equipment in production will allow making a scientifically sound decision regarding the choice of parameters for further diagnostics taking into account a variety of different information types. It will allow conducting deeper diagnostics and thereby identifying equipment failure.

Keywords: parameter selection algorithm, algorithm for searching deviations of harmonic oscillation values, database, knowledge base

Acknowledgements. This work was supported by RSF grant No. 23-29-00415

References

- Jian, W., Wenbing, Z., Chao, G., Demeng, B., Kuihua, W. (2020) 'The new developed health index for power transformer condition assessment', *Proc. ACPEE*, pp. 1880–1884. doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136344.
- Li, Z., Sun, J., Dong, J., Li, H., Du, F. (2019) 'Train-level fault diagnosis based-on feature selection', *Proc. SAFEPROCESS*, pp. 772–775. doi: 10.1109/SAFEPROCESS45799.2019.9213309.
- Qunying, Y., Haidan, L., Xiaowei, L., Kun, W., Guozhi, Z., Xiaoxing, Z. (2021) 'Research on fault diagnosis technology of less-oil immersed electric equipment based on pressure', *Proc. CIEEC*, pp. 1–8. doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510186.
- Kolodenkova, A., Vereshchagina, S. (2023) 'Method for selecting diagnostic parameters using information technologies under a set of various types of information', *Proc. ICIEAM*, pp. 916–920. doi: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139048.
- Tabora, M.J., de Lima Tostes, M.E., de Matos, E.O. et al. (2020) 'Voltage harmonic impacts on electric motors: A comparison between IE2, IE3 and IE4 induction motor classes', *Energies*, 13, pp. 1–18. doi: 10.3390/en13133333.
- Gnacinski, P., Muc, A., Peplinski, M. (2021) 'Influence of voltage subharmonics on line start permanent magnet synchronous motor', *IEEE Access*, 9, pp. 164275–164281. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3133279.
- Liu, Z., Xu, Y., Jiang, H., Tao, Sh. (2020) 'Study on harmonic impedance estimation and harmonic contribution evaluation index', *IEEE Access*, 8, pp. 59114–59125. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2982950.
- Xu, J., Deng, W., Li, G., Zhao, Ch., Liu, Ch. (2021) 'Optimal second-harmonic current injection for capacitor voltage fluctuation reduction in hybrid MMCs under grid-side SLG faults', *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(4), pp. 2857–2866. doi: 10.1109/TPWRD.2021.3118690.
- Korenkov, D.A., Timokhin, V.A. (2022) 'Investigation of voltage and current harmonic distortions of pulse power supplies', *Proc. Int. Conf. Energy and Resources Saving – XXI Century*, pp. 62–66 (in Russ.).
- Antonov, A.I., Rudy, D.Yu., Khatsevsky, K.V. (2023) 'Study of the quality of electric power in electric networks with semiconductor converters', *Yugra State University Bull.*, (1), pp. 123–130 (in Russ.). doi: 10.18822/byusu202301123-130.
- Kolodenkova, A.E., Guda, A.N., Vereshchagina, S.S., Tuvayeva, V.O. (2022) 'Diagnostics of the technical condition of industrial equipment based on a system of hierarchical production rules', in *LNNS. Proc. IITI*, 330, pp. 180–187. doi: 10.1007/978-3-030-87178-9_18.

Авторы

Колоденкова Анна Евгеньевна¹, д.т.н.,
доцент, заведующий кафедрой,
anna82_42@mail.ru

Верещагина Светлана Сергеевна¹,
к.т.н., доцент,
werechaginass@mail.ru

Authors

Anna E. Kolodenkova¹, Dr.Sc. (Engineering),
Associate Professor, Head of Chair,
anna82_42@mail.ru

Svetlana S. Vereshchagina¹,
Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, werechaginass@mail.ru

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, 443100, Россия

¹ Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation