

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

УДК 621.3

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.2>

## СОСТАВЛЕНИЕ ПРОГНОЗОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ВОЗДУШНЫМ ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С ПОМОЩЬЮ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ

Юлия Николаевна Кондрашова<sup>1\*</sup>, Андрей Максимович Третьяков<sup>2</sup>,  
Алексей Витальевич Шалимов<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова (д. 38 ул. Ленина, Магнитогорск, 455000, Российская Федерация)  
<sup>1</sup> [rotjuil720@mail.ru](mailto:rotjuil720@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-5280-5666>  
<sup>2</sup> [andreyt2001@yandex.ru](mailto:andreyt2001@yandex.ru)  
<sup>3</sup> [shalimov-alexey@mail.ru](mailto:shalimov-alexey@mail.ru)  
\* Автор, ответственный за переписку

**Аннотация. Введение.** В настоящее время отказы являются одной из основных и актуальных проблем для нормального функционирования систем электроснабжения, имеют на первый взгляд непредсказуемый характер, однако, помимо случайных, существуют отказы, происходящие по некоторой закономерности. В качестве основного электрооборудования рассматриваются силовые трансформаторы, электрические машины и линии электропередач разного уровня напряжений. Общей тенденцией является высокий процент износа, моральное и физическое старение основного и вспомогательного электрооборудования. **Цель** – применение методов математического анализа и предиктивной аналитики к прогнозированию количества отказов электрооборудования и разработка алгоритма расчета прогнозирования для оценки ущерба в будущий период. **Материалы и методы.** Применяемые методики основаны на аппроксимации и на экстраполяции данных отказов электрооборудования за 2011–2021 годы в условиях системы электроснабжения Магнитогорского энергетического узла. Для удобства работы с математическим аппаратом были использованы программы ПО «Matlab» в формате направленных векторов и утилиты «Curve fitting», а также ПО «Microsoft Excel». **Результаты и обсуждение.** В статье предлагается методика прогнозирования отказов на будущий период, которая может позволить при достаточном количестве исходных данных получить предполагаемое количество отказов по исследуемому объекту. **Заключение.** По итогам проведенного исследования разработана методика для краткосрочного прогнозирования количества отказов, также она была применена к реальным статистическим данным и показала допустимую достоверность и адекватность. В дальнейшем подобные прогнозы можно выполнять для различных видов электрооборудования в условиях городских и промышленных сетей для будущего планирования бюджетных средств, выделяемых для дополнительной диагностики, замены и профилактического ремонта по состоянию на текущий момент, что позволит предотвратить масштабность аварий, сократить их количество, повысить надёжность системы электроснабжения промышленного и городского потребителя.

**Ключевые слова:** прогноз, отказ, надежность, воздушная линия электропередач, аппроксимация

**Для цитирования:** Кондрашова Ю. Н., Третьяков А. М., Шалимов А. В. Составление прогнозов применительно к воздушным линиям электропередач с помощью предиктивной аналитики // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 1(100). С. 20–30. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.2>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.12.2023;

одобрена после рецензирования 10.01.2024;

принята к публикации 29.01.2024.

Research article

## MAKING PREDICTIONS FOR OVERHEAD POWER LINES APPLYING PREDICTIVE ANALYTICS

Yulia N. Kondrashova<sup>1\*</sup>, Andrey M. Tretyakov<sup>2</sup>, Alexey V. Shalimov<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenina st., Magnitogorsk, 455000, Russian Federation)  
<sup>1</sup> [rotjuil720@mail.ru](mailto:rotjuil720@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-5280-5666>  
<sup>2</sup> [andreyt2001@yandex.ru](mailto:andreyt2001@yandex.ru)  
<sup>3</sup> [shalimov-alexey@mail.ru](mailto:shalimov-alexey@mail.ru)  
\* Corresponding author

**Abstract. Introduction.** Currently, failures are one of the main and urgent problems for the normal functioning of power supply systems, they are at first glance unpredictable, however, in addition to accidental, there are failures that occur according to some regularity. Power transformers, electric machines and transmission lines of different voltage levels are considered the main electrical equipment. It should be noted that the general trend is a high percentage of wear and tear, moral and physical aging of the main and auxiliary electrical equipment. **Goal** – the application of methods of mathematical analysis and predictive analytics to predict the number of failures of electrical equipment and the development of an algorithm for calculating forecasting to assess damages in the future. **Materials and Methods.** The applied methods are based on approximation and on extrapolation of the data of electrical equipment failures for 2011–2021 in the conditions of the power supply system of Magnitogorsk energy hub. For convenience of work with mathematical apparatus were used software programs “Matlab” in the format of directed vectors and utilities “Curve

fitting”, as well as software “Microsoft Excel”. **Results and discussion.** The article proposes a methodology for predicting failures for the future period, which can allow, given a sufficient amount of input data, to obtain the estimated number of failures for the object under study. **Conclusion.** According to the results of the conducted research the methodology for short-term forecasting of the number of failures was developed, it was also applied to real statistical data and showed acceptable reliability and adequacy. In the future, similar forecasts can be performed for various types of electrical equipment in the conditions of urban and industrial networks for future planning of budgetary funds allocated for additional diagnostics, replacement and preventive maintenance as of the current moment, which will prevent the scale of accidents, reduce their number, which will lead to increased reliability of the power supply system of industrial and urban consumers.

**Keywords:** forecast, failure, reliability, overhead power line, approximation

**For citation:** Kondrashova YN, Tretyakov AM, Shalimov AV. Making predictions for overhead power lines applying predictive analytics. *Newsletter of North-Caucasus Federal University*. 2024;1(100):20-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.1.2>

**Conflict of interest:** the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 20.12.2023;

approved after reviewing 10.01.2024;

accepted for publication 29.01.2024.

**Введение / Introduction.** В настоящее время с развитием компьютерных технологий и удобства сбора информации об отказах появляется возможность для обработки и изучения отказов электрооборудования. Сейчас повсеместно внедряется мониторинг отказов с заполнением электронных форм, в которых указываются все основные их причины, продолжительность и частота. Также появились программные комплексы для удобной обработки информации, которые позволяют достаточно быстро, занеся в программу все нужные данные, получить аппроксимированную функцию и её график, что является идеальными условиями для изучения графика и построения прогноза отказов электрооборудования на будущее, помимо этого такой анализ позволяет изучить внешние процессы, влияющие на объект, например, факторы окружающей среды, колебания изменения электрической нагрузки, и изучить внутренние процессы: старение изоляции, материалов и износ вспомогательного и основного электрооборудования.

Основными элементами практически любой системы электроснабжения можно назвать силовые трансформаторы, электрические машины и линии электропередач разного уровня напряжений.

Рассматривая силовые трансформаторы, авторы [1] предлагают контролировать в них прочность электрической изоляции, конкретно диэлектрические характеристики основной изоляции и высоковольтных вводов, помимо этого важна частота частичных разрядов и состав масла трансформатора, в котором происходят разряды.

Переходя к электродвигателям – электродвигателям и электрогенераторам, – необходимо контролировать частоту вращения вала, а также уровень вибраций в конструктивных элементах машин. Далее авторы [2] замечают, что путем анализа этих показателей и их графиков можно получить информацию о техническом состоянии машины.

Если подобные подходы применить к линиям электропередач, то это приведет к значительному удорожанию линий, а также будет осложнено тем, что они имеют большую протяженность. В результате возникает необходимость большого количества оборудования, с которого должен осуществляться сбор данных, а на больших расстояниях это сложно реализуемо. Для упрощения анализа отказов линий кажется верным переход к анализу статистики и окружающей линии местности.

Выделим основные параметры, которые будут задействованы в расчетах при применении описанной методики – типы линий, напряжение на них, участок прокладки, количество отказов и момент отказа.

**Материалы и методы исследований / Materials and methods of research.** Основа этой методики заключается в обработке имеющихся данных для получения некой зависимости, которая описывает характер изменения величины, с учетом предположения, что рассмотрение этой зависимости на будущее будет создаваться и совпадать с тенденциями развития уже известной взаимосвязи.

Предлагаемая методика заключается в аппроксимации уже известных статистических данных и получении кривой распределения, которая описывает изменение отказов, после чего функцию экстраполируют на будущий период с учетом того, что вид зависимости не меняется, это является прогнозным значением. В соответствии с методикой был разработан алгоритм прогнозирования.

1. Выбор шага дискретизации для конкретного вида графика. Построение графика по имеющейся статистике для проверки работоспособности; после визуального анализа выбор тренда, описывающего непериодический характер графика. Построение данных за исключением первичной аппроксимирующей функции или линии тренда.

2. Визуальный анализ для выбора второй уже периодической функции для нового графика, повторная аппроксимация. Проверка достоверности вторичной аппроксимации. Суммирование полученных функций после первой и второй аппроксимаций (итоговая функция, описывающая закономерность отказов).

3. Если проверочный прогноз совпадает с имеющимися данными, происходит пересчет коэффициентов для итоговой функции по такой же логике и осуществляется прогноз на будущий период.

В результате составлена блок-схема по предложенному алгоритму (рис. 1).

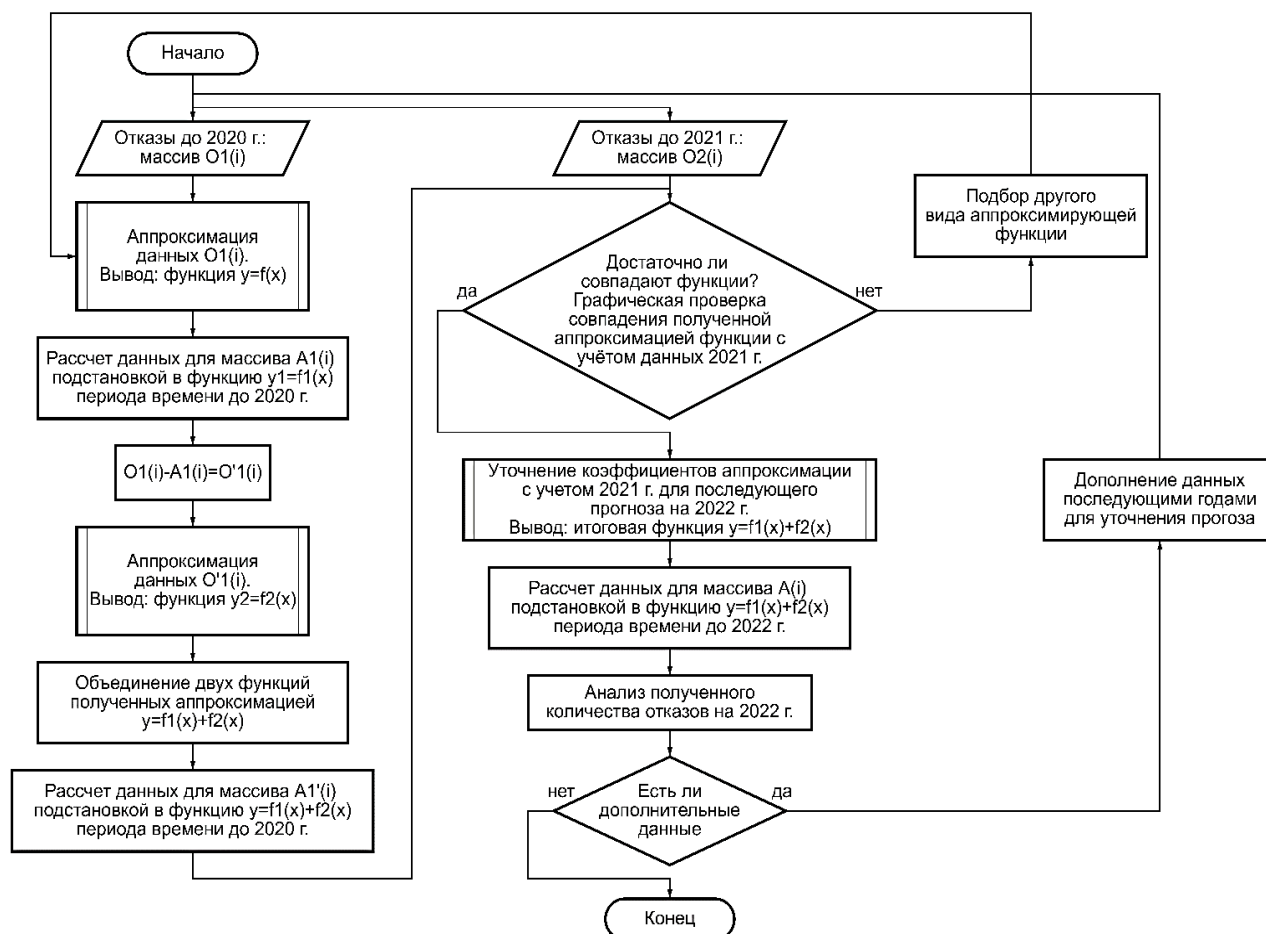


Рис. 1. Алгоритм прогнозирования / Fig. 1. Prediction algorithm

Также существуют подборки данных, в которых не будет наблюдаться общая линия тренда, задающая снижение или увеличение количества отказов, в таком случае аппроксимация происходит сразу периодическими функциями, например, рядом Фурье или синусоидами, и сразу же дают хорошую достоверность. В таком случае отказы не имеют общего тренда на повышение или снижение, который при первичной аппроксимации можно описать аperiodической функцией. Если её не учитывать, то аппроксимация сразу периодическими функциями может давать низкую достоверность, исходя из этого первичная аппроксимация аperiodической функцией обязательна и она создает большой спектр возможностей по аппроксимации периодическими функциями. Получается, что такой алгоритм может показать достаточную степень надежности [3, 4] для прогнозов.

Также стоит отметить, что прогноз будет достаточно достоверным лишь на ближайший шаг дискретизации графика, дальнейшие прогнозы могут быть неточны. Поэтому прогнозирование на 2 и более шага стоит делать, только дополняя реальной статистикой данные за первый прогнозный шаг.

**Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion.** После проведения работы были найдены случаи, когда аппроксимированная функция и реальные данные имеют большие отклонения при пересчете коэффициентов. В качестве примера можно привести увеличение амплитуды, изменение вида перегибов графика (рисунки 2, 3). При таком изменении подо-

бранную функцию стоит считать неверной и провести полный перерасчет для нее, выбрав другие виды аппроксимации [5, 6].

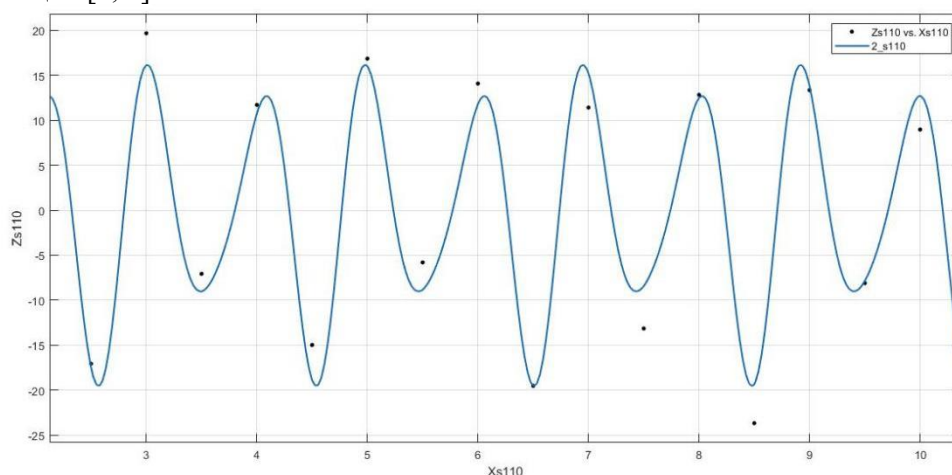


Рис. 2. Пример построения функции для проверки в виде ряда Фурье 3-й степени /  
Fig. 2. Example of constructing a function for verification as a Fourier series of degree 3

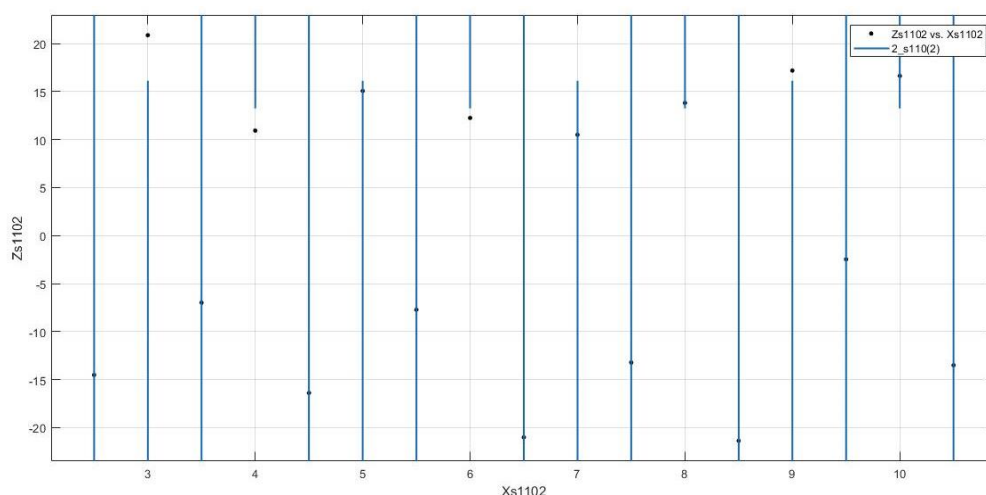


Рис. 3. Пример построения функции с учётом проверенного значения в виде ряда Фурье 3-й степени /  
Fig. 3. Example of constructing a function taking into account the checked value in the form  
of a Fourier series of degree 3

Выполним расчёт по предложенной методике для воздушных линий 110 кВ промышленной части Магнитогорского энергетического узла. Данный выбор был обусловлен статистическими данными, представленными отказами за период времени с 2011 по 2021 год согласно уровням напряжений. Причем выбор именно воздушных линий обусловлен их количеством в зависимости от уровня напряжений и привязкой к системе электроснабжения многоуровневой системы промышленной нагрузки.

**Первичная аппроксимация.** Предварительно необходимо выбрать шаг дискретизации графика по статистическим данным. Как показала дальнейшая обработка графиков, наиболее удобный шаг для статистики по отказам линий – год или полугодие. В условиях большого количества и преимущественно случайного характера данных такой шаг позволяет снизить влияние сезонного характера отказов и минимизировать количество нулевых точек графика. Подытоживая влияние характера данных на итоговый результат, следует также отметить, что сокращение шага дискретизации до значений менее полугодия приведёт к снижению достоверности получаемых результатов и значительному увеличению погрешности.

На основании имеющейся информации за 2011–2021 годы построены графики (рис. 4) динамики отказов с шагом в год и полгода.

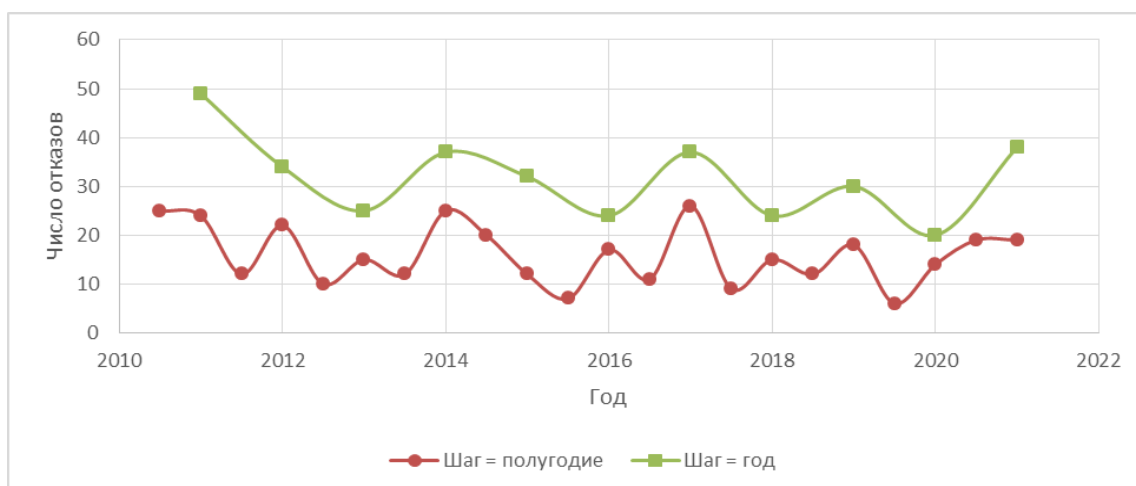


Рис. 4. Выбор шага дискретизации / Fig. 4. Sampling step selection

Видно, что график с полугодовым шагом имеет более хаотичный характер. В случае же с шагом, равным году, наблюдаются некоторая упорядоченность и близость к стандартным математическим функциям. Поэтому в дальнейшем для этих данных применяется шаг дискретизации, равный году.

Из имеющейся статистики 2011–2021 годов выделен участок графика. На графике (рис. 5) можно заметить колебания с некоторой периодичностью и амплитудой, которые возможно взять за основу вторичной аппроксимирующей функции. Заметно, что количество отказов в 2011 году сильно отклоняется от общего тренда, поэтому было отброшено. Отказы 2021 года также не учтены в аппроксимации и будут использованы для проверки качества прогноза. Визуально заметно, что на заданном участке график имеет тренд на убывание. Для начального подбора первичной аппроксимирующей функции можно воспользоваться встроенными средствами ПО «Microsoft Excel» (далее Excel) – линией тренда.

Для уменьшения коэффициентов и удобства работы годам в указанном периоде присвоены порядковые номера, начиная с 1.

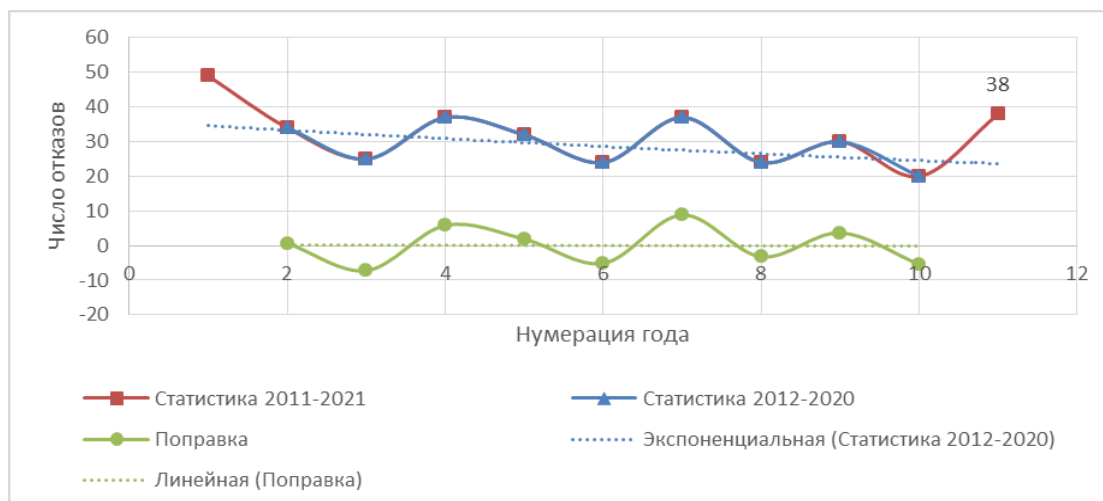


Рис. 5. График отказов ВЛ 110 кВ по предприятию черной металлургии / Fig. 5. Schedule of 110 kV overhead line failures by ferrous metallurgy enterprise

Для определения точных коэффициентов функции данные необходимо импортировать в ПО «Matlab» (далее Matlab) в формате направленных векторов. После чего посредством утилиты «Curve fitting» произвести точный расчёт коэффициентов выбранной аппроксимирующей функции. Для данного примера получен следующий отчёт:

«General model Exp1:

$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$

Coefficients (with 95 % confidence bounds):

$a = 35,66$  (22,02; 49,3)

$b = -0.03378$  (-0,09634; 0,02878)

Goodness of fit:

SSE: 248,4

R-square: 0,1977

Adjusted R-square: 0,08304

RMSE: 5,957»

Видно, что величина достоверности аппроксимации (R-square: 0.1977) мала, учитывая, что она должна стремиться к 1. Это ожидаемо, учитывая форму графика. После внесения поправки на графике путём вычитания величин в расчётных точках полученной функции из изначальных данных график переносится на ось абсцисс. Эта поправка позволяет в дальнейшем работать уже со следующей итерацией аппроксимации.

**Вторичная аппроксимация.** Как отмечено выше, на графике отказов заметна периодичность. После внесения поправки на первичную аппроксимацию и приведения графика к оси абсцисс этот факт стал выделяться более явно (рис. 5). После внесённой поправки данные снова внесены в Matlab. Для вторичной аппроксимации был рассмотрен ряд различных функций (рис. 6–9).

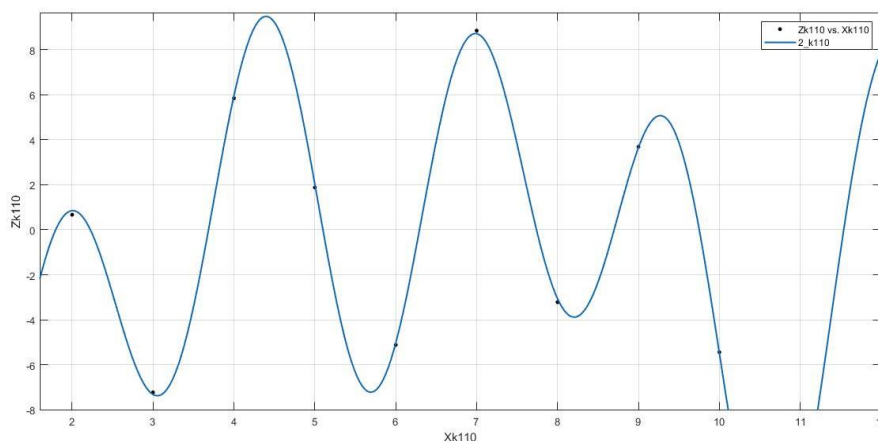


Рис. 6. Вторичная аппроксимация через сумму 3 синусоид / Fig. 6. Secondary approximation through the sum of 3 sinusoids

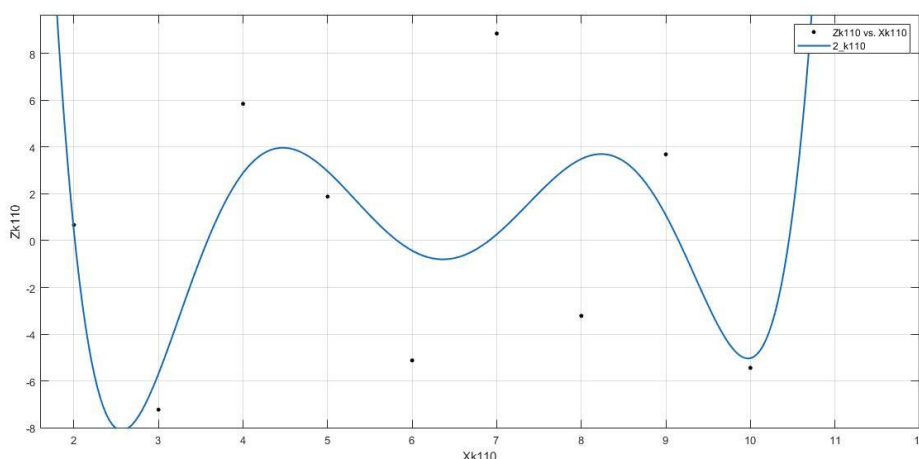


Рис. 7. Вторичная аппроксимация через полином 6-й степени / Fig. 7. Secondary approximation through a polynomial of degree 6

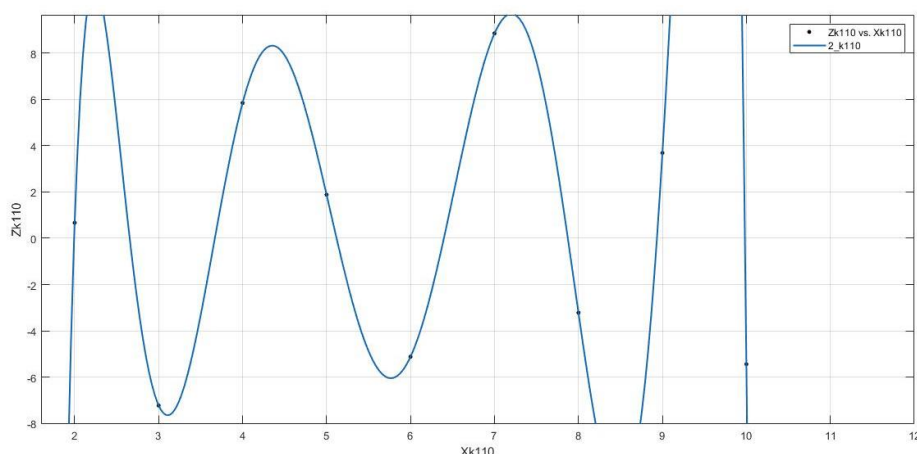


Рис. 8. Вторичная аппроксимация через полином 8-й степени /  
Fig. 8. Secondary approximation through a polynomial of degree 8

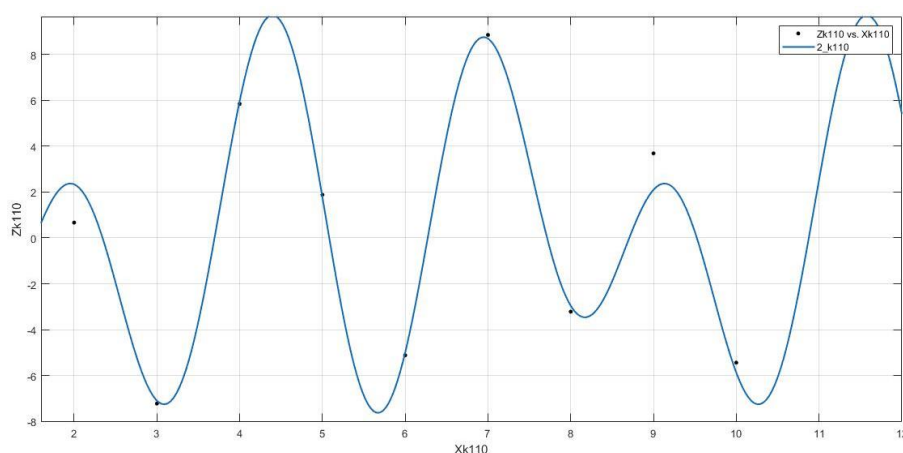


Рис. 9. Вторичная аппроксимация через ряд Фурье 3-й степени /  
Fig. 9. Secondary approximation through Fourier series of degree 3

Все рассмотренные функции подбирались по условию максимизации величины достоверности аппроксимации и повторяемости общей формы исходного графика. Также важным критерием выбора функции является близость тестового прогнозного значения к действительному статистическому. Более остальных удовлетворяет всем требованиям функция, которая имеет вид ряда Фурье 3-й степени (рис. 9). Отчёт о расчёте коэффициентов данной функции приведён ниже:

«General model Fourier3:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot \cos(x \cdot w) + b_1 \cdot \sin(x \cdot w) + a_2 \cdot \cos(2 \cdot x \cdot w) + b_2 \cdot \sin(2 \cdot x \cdot w) + a_3 \cdot \cos(3 \cdot x \cdot w) + b_3 \cdot \sin(3 \cdot x \cdot w)$$

Coefficients (with 95 % confidence bounds):

$$a_0 = 0,4834 \text{ } (-10,57; 11,53)$$

$$a_1 = 0,98 \text{ } (-14,27; 16,23)$$

$$b_1 = -1,199 \text{ } (-17,27; 14,87)$$

$$a_2 = 2,272 \text{ } (-14,49; 19,04)$$

$$b_2 = 2,608 \text{ } (-20,58; 25,8)$$

$$a_3 = 3,862 \text{ } (-48,49; 56,21)$$

$$b_3 = -4,977 \text{ } (-48,66; 38,71)$$

$$w = 0,8751 \text{ } (0,2527; 1,498)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE} = 5,645$$

$$\text{R-square} = 0,9773$$

Adjusted R-square: 0,8182

RMSE: 2,376»

Так как графики, построенные в Excel, получены методом интерполяции, период и общий вид аппроксимирующей функции имеют некоторые отличия. Однако, как можно судить по отчёту, достоверность аппроксимации (R-square: 0.9773) является очень высокой.

Итоговая функция (1) является суммой первичной и вторичной аппроксимаций и имеет следующий вид:

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + a_0 + a_1 \cdot \cos(x \cdot w) + b_1 \cdot \sin(x \cdot w) + a_2 \cdot \cos(2 \cdot x \cdot w) + b_2 \cdot \sin(2 \cdot x \cdot w) + a_3 \cdot \cos(3 \cdot x \cdot w) + b_3 \cdot \sin(3 \cdot x \cdot w), \quad (1)$$

где коэффициенты функции равны:  $a = 35,66$ ;  $b = -0,03378$ ;  $a_0 = 0,4834$ ;  $a_1 = 0,98$ ;  $b_1 = -1,199$ ;  $a_2 = 2,272$ ;  $b_2 = 2,608$ ;  $a_3 = 3,862$ ;  $b_3 = -4,977$ ;  $w = 0,8751$ .

Построение графиков исходных данных и итоговой аппроксимирующей функции приведено на рис. 10.

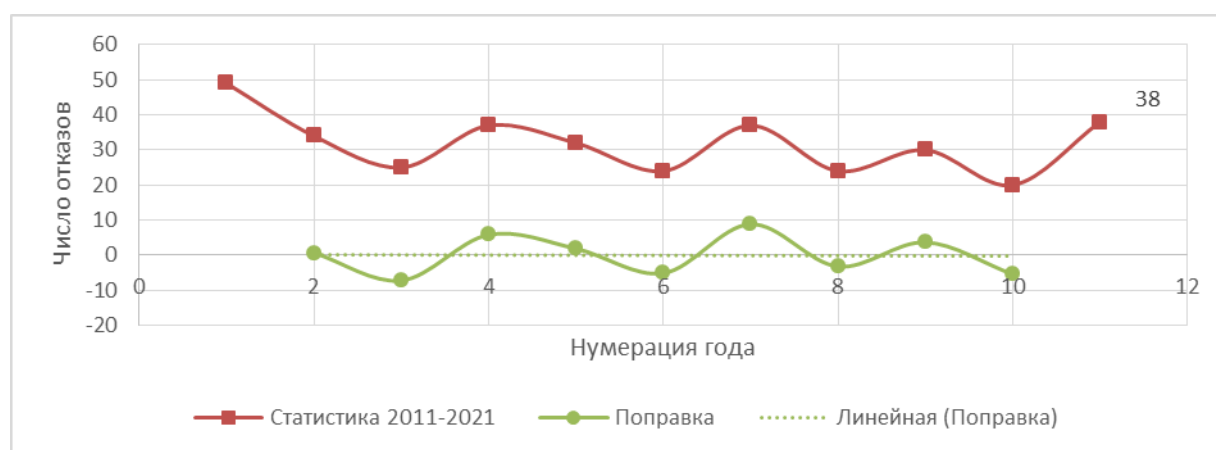


Рис. 10. Тестовый прогноз отказов ВЛ 110 кВ по предприятию черной металлургии /  
Fig. 10. Test forecast of 110 kV overhead line failures by ferrous metallurgy enterprise

В данном случае прогноз на 2021 год (номер 11) ниже статистических данных. Это обусловлено аномальным броском отказов в течение этого года. Он связан с вводом в работу новой аглофабрики, выбросы которой вызвали многочисленные перекрытия изоляторов на оборудовании. Также замечена увеличенная доля отказов с невыясненными причинами.

Полученная итоговая функция аппроксимации обладает достаточной достоверностью (R-square: 0,9992) и с учётом изложенных условий может быть утверждена.

*Прогнозирование.* На данном этапе необходимо также пошагово составить аппроксимирующую функцию с учётом 2021 года, прогнозируя отказы на 2022 год.

Все описанные ранее графики перестроены и приведены на рис. 11.

Приведённая итоговая аппроксимирующая функция, согласно методике, не меняет общего вида и поведения, но пересчитывается с учётом новых коэффициентов:

$a = 31,98$

$b = -0,009378$

$a_0 = -0,3722$

$a_1 = 0,1888$

$b_1 = -1,384$

$a_2 = 0,9673$

$b_2 = 3,8$

$a_3 = 6,877$

$b_3 = -1,638$

$w = 0,9209$

Полученная для прогноза итоговая функция аппроксимации также обладает высокой достоверностью ( $R\text{-square: } 0,9994$ ) и с учётом изложенных условий может быть утверждена.

Как видно, прогноз на 2022 год достаточно близок к действительному количеству отказов, что говорит о применимости методики в конкретных условиях.

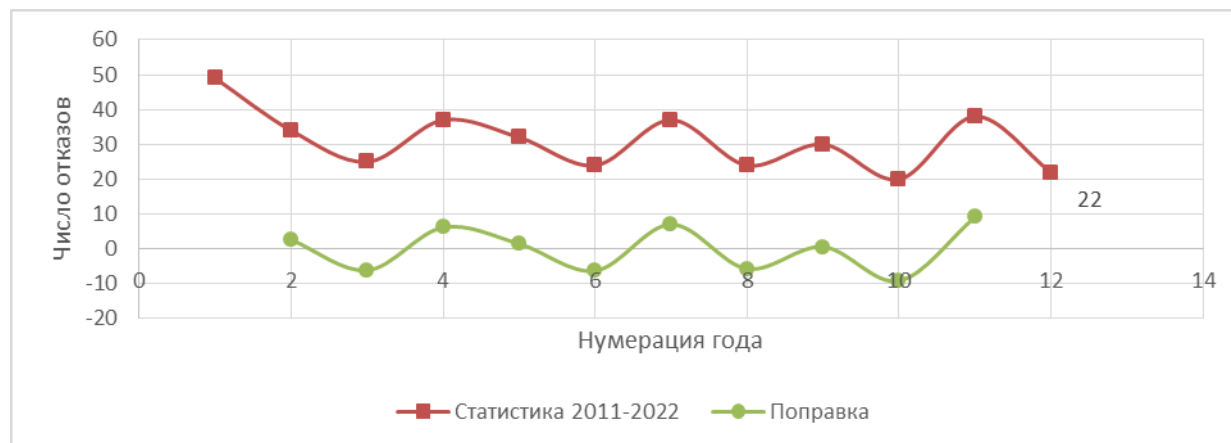


Рис. 11. Рабочий прогноз отказов ВЛЭП-110 кВ по предприятию черной металлургии /  
Fig. 11. Operating forecast of 110 kV overhead power transmission line failures by ferrous metallurgy enterprise

**Заключение / Conclusion.** В результате проведенной работы была создана методика по прогнозированию с использованием математического аппарата, такого как аппроксимация и экстраполяция. Для удобства работы с математическим аппаратом были использованы программы ПО «Matlab» в формате направленных векторов и утилиты «Curve fitting», а также ПО «Microsoft Excel».

Предложенная методика включает в себя два уровня аппроксимации для более точного анализа функции, также проверку правильности выбранной функции, построение прогноза и внесение корректив функции в связи с полученными новыми данными отказов.

Проведен анализ данных по отказам для подстанций, входящих в предприятие черной металлургии. Рассчитаны коэффициенты для аппроксимирующей функции. Анализ показал достаточную достоверность коэффициентов функции для прогноза. После чего был построен прогноз на 2022 год, который, в свою очередь, оказался близким, 22 реальных отказа при 25 прогнозных, что говорит об адекватности предложенной методики и возможности её применения впоследствии.

Также необходимо отметить, что отказы часто имеют случайный характер, также могут происходить ситуации, в которых в один из периодов произойдут непредсказуемые отключения, вносящие ошибку или неточность в общий график, которая может быть устранена только либо вручную, либо сглажена последующими годами или большой уже имеющейся статистикой. Получается, что для точности и стабильности прогнозов на будущие периоды требуется большой пласт статистических данных, которые при произведении над ними математических операций будут сам собой сглаживать критические точки, выпадающие из общей тенденции. Такой подход приведёт к минимальным погрешностям, вносимым большим количеством случайных (непредсказуемых) отказов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гокенбах Е., Чжан С., Лю Ч. [и др.]. Прогнозирование срока службы силовых трансформаторов с помощью мониторинга состояния // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 4(25). С. 82–88.
2. Ильичев В. Ю., Юрик Е. А. Использование методов предиктивной аналитики для обработки сигналов с датчиков частоты вращения роторных машин // Научное обозрение. Технические науки. 2019. № 1. С. 22–26.
3. Одинцов К. Э., Ротанова Ю. Н., Карандаева О. И. [и др.]. Методика прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования при эксплуатации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3-1. С. 192–198.
4. Кондрашова Ю. Н., Третьяков А. М., Шалимов А. В. Оценка влияния разработки регламентов технического обслуживания и ремонта производственного оборудования с целью минимизации затрат и убытков предприятия черной металлургии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2022. Т. 20. № 1. С. 112–120. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-112-120>.

5. Методы интерполяции и аппроксимации // Portal.tpu. URL: [https://portal.tpu.ru/SHARED/m/MBB/uchebnaya\\_rabota/Model/Tab/Interp\\_app.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/m/MBB/uchebnaya_rabota/Model/Tab/Interp_app.pdf) (дата обращения: 14.06.2023).
6. Страшко И. В., Кравченко Т. С. Сущность методов экстраполяции // Студопедия. URL: [https://studopedia.ru/17\\_38085\\_sushchnost-metodov-ekstrapolyatsii.html](https://studopedia.ru/17_38085_sushchnost-metodov-ekstrapolyatsii.html) (дата обращения: 14.06.2023).

## REFERENCES

1. Gockenbach E, Zhang S, Liu C et al. Predicting the service life of power transformers by condition monitoring. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* = Electricity. Transmission and Distribution. 2014;4(25):82-88. (In Russ.).
2. Ilyichev VYu, Yurik EA. Application of the predictive analytics methods for signal processing from the rotor machine speed sensors. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki* = Scientific review. Technical Sciences. 2019;1:22-26. (In Russ.).
3. Odintsov KE, Rotanova YN, Karandaeva OI et al. Methodology for predicting the residual life of electrical equipment in operation / *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* = Izvestia Tula State University. Technical sciences. 2010;3-1:192-198. (In Russ.).
4. Kondrashova YuN, Tretyakov AM, Shalimov AV. Evaluation of the impact of the development of regulations for maintenance and repair of production equipment in order to minimize costs and losses of ferrous metallurgy enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. GI Nosova* = Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after GI Nosov. 2022;(20(1)):112-120. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-112-120>. (In Russ.).
5. Methods of interpolation and approximation. Portal.tpu. Available from: [https://portal.tpu.ru/SHARED/m/MBB/uchebnaya\\_rabota/Model/Tab/Interp\\_app.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/m/MBB/uchebnaya_rabota/Model/Tab/Interp_app.pdf) [Accessed 14 June 2023]. (In Russ.).
6. Strashko IV, Kravchenko TC. Essence of extrapolation methods. Studopedia. Available from: [https://studopedia.ru/17\\_38085\\_sushchnost-metodov-ekstrapolyatsii.html](https://studopedia.ru/17_38085_sushchnost-metodov-ekstrapolyatsii.html) [Accessed 14 June 2023]. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

- Юлия Николаевна Кондрашова** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Scopus ID: 58262426200
- Андрей Максимович Третьяков** – магистрант 1-го курса кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Scopus ID: 57771534700, Researcher ID: JYP-0182-2024
- Алексей Витальевич Шалимов** – магистрант 1-го курса кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Scopus ID: 57771599500, Researcher ID: JYO-9560-2024

## ВКЛАД АВТОРОВ

- Юлия Николаевна Кондрашова**  
Проведение исследования – интерпретация и анализ полученных данных, разработка алгоритма расчета. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.
- Андрей Максимович Третьяков**  
Сбор, анализ полученных данных, разработка алгоритма расчета. Подготовка и редактирование текста, участие в научном дизайне.
- Алексей Витальевич Шалимов**  
Сбор статистических данных по отключениям, анализ полученных данных, разработка алгоритма расчета. Подготовка и редактирование текста и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Yulia N. Kondrashova** – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor of the Department of Electricity Supply of Industrial Enterprises, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Scopus ID: 58262426200
- Andrey M. Tretyakov** – Master's Student of the 1st year of the Department of Electrical Power Supply of Industrial Enterprises, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Scopus ID: 57771534700, Researcher ID: JYP-0182-2024
- Alexey V. Shalimov** – Master's Student of the 1st year of the Department of Electricity Supply of Industrial Enterprises, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Scopus ID: 57771599500, Researcher ID: JYO-9560-2024

**CONTRIBUTION OF THE AUTHORS****Yulia N. Kondrashova**

Conducting the study – interpretation and analysis of the obtained data, development of the calculation algorithm.  
Approval of the final version – taking responsibility for all aspects of the work, integrity of all parts of the article and its final version.

**Andrey M. Tretyakov**

Collection, analysis of the obtained data, development of the calculation algorithm. Preparation and editing of the text, participation in scientific design.

**Alexey V. Shalimov**

Collection of statistical data on outages, analysis of the obtained data, development of the calculation algorithm.  
Preparation and editing of the text and formation of its final version, participation in scientific design.