2024, Т. 166, кн. 4 С. 518–531 ISSN 2541–7746 (Print) ISSN 2500–2198 (Online)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.315.1: 519.876.5

doi: 10.26907/2541-7746.2024.4.518-531

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЛЭП С ДРЕВОВИДНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

А.В. Карпов, Д.В. Сарычев

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

В работе представлена компьютерная модель, реализующая двухступенчатую систему определения мест возникновения повреждений на основе анализа отражённых сигналов. Приведены результаты моделирования для линии электропередачи с различным количеством ответвлений от магистрали. Проведен анализ зависимости эффективности локализации мест повреждений от величины коэффициента битовых ошибок в сети. Выполнен анализ зависимости показателя надёжности диагностики от количества ответвлений и вида повреждений.

Ключевые слова: двухступенчатая система диагностики, линия электропередачи с древовидной топологией, битовая ошибка, компьютерное моделирование, FSK-модуляция

Введение

Развитие современных технологий приводит к быстрому росту потребления электроэнергии. Это подчеркивает важность модернизации электрических сетей для обеспечения надежного и качественного энергоснабжения потребителей. Одним из многообещающих направлений является реализация концепции «Smart grid», подразумевающая комплексную автоматизацию и информатизацию процессов производства, передачи и потребления электроэнергии. Внедрение интеллектуальных технологий особенно эффективно в распределительных электрических сетях, отличающихся сложной топологией с многочисленными ответвлениями от магистралей. Использование автоматизированных систем мониторинга позволяет существенно повысить надежность таких сетей за счет быстрого обнаружения и локализации неисправностей сети [1–3].

Рассматриваемая в данной работе линия электропередачи (ЛЭП) с древовидной топологией представляет собой наиболее сложный объект для исследования локационным методом, так как ввиду большого числа переотражений регистрация сигнала происходит при низком отношении сигнал/шум. Примером такой ЛЭП является ЛЭП 6–10 кВ. Древовидная топология представляет собой схему построения распределительных электросетей, в которой линии электропередач расходятся радиально, без замкнутых контуров, от одной центральной подстанции или источника питания к периферийным потребителям. Такая схема напоминает структуру дерева с расходящимися от одного ствола ветвями, питающими рассредоточенных абонентов на местности. Основное её отличие от других топологий – наличие единственного централизованного узла выдачи мощности в сеть и отсутствие резервных замкнутых контуров.

Статья построена следующим образом. Во введении подчеркивается актуальность задачи диагностики повреждений в распределительных электрических сетях со сложной топологией. Обосновывается целесообразность применения двухэтапной системы диагностики методов, основанных на анализе отраженных сигналов. В первом разделе описывается предложенная в работах [4,5] концепция построения «Smart grid» для такого типа энергосистем. Приводятся особенности реализации двухэтапного алгоритма диагностики повреждений с использованием информации о битовых ошибках в каналах связи. Затем описывается структура разработанной авторами компьютерной модели, приводятся результаты серии вычислительных экспериментов для сетей с количеством ответвлений от 0 до 3. Анализируется зависимость показателей эффективности локализации повреждений от таких факторов, как тип повреждения и количество ответвлений. В заключении формулируются основные выводы о работоспособности двухэтапного алгоритма для сетей с заданной конфигурацией.

1. Концепция двухступенчатой системы диагностики

В качестве примера рассмотрим электрическую сеть с тремя отпайками (рис. 1). Сеть состоит из одного центрального и четырех оконечных пунктов: RX1, RX2, RX3, RX4, RX5. Диагностическая система представляет собой информационную сеть, состоящую из трех основных элементов.



Рис. 1. Топология ЛЭП с тремя отпайками

1. Локатор. Центральный пункт RX1 оснащен локатором, который подключен к электрической сети 6–10 кВ через устройство присоединения. Импульсное зондирование позволяет определить только расстояние до места повреждения, но не решает проблему определения сегмента, на котором произошло повреждение, так как для некоторых расстояний от RX1 это может произойти на любой отпайке (сегменте ЛЭП, связанным с любым оконечным пунктом).

2. Диагностическая информационная сеть, с помощью которой снимается неоднозначность определения места повреждения. Каждый оконечный пункт оснащен модемами, которые подключены к обмоткам понижающего трансформатора, для определенности считаем, что они подключены к фазе А. Каждый оконечный пункт напрямую связан с двумя другими оконечными пунктами. По определенному протоколу осуществляется мониторинг уровня битовых ошибок на каждом из пунктов. Данные об уровне ошибок передаются по управляющей информационной сети на центральный пункт, где по возрастанию уровня ошибок в двух каналах связи, связанных с конкретным оконечным устройством, определяется наличие повреждения и нужный сегмент.

3. Управляющая информационная сеть реализована в виде дополнительных каналов связи, по которым вся информация передается в центр управлениям RX1, где и принимается решение о наличии повреждения, расстоянии и месте повреждения.

Целью данной работы является разработка модели двухступенчатой системы диагностики линий электропередачи на базе зондирующего локационного метода. Работа посвящена разработке алгоритма второй ступени диагностики древовидных сетей электропередач, основанной на статистической оценке изменения уровня битовых ошибок в диагностической информационной сети и проведения исследования эффективности и достоверности разработанной двухступенчатой системы диагностики.

2. Описание компьютерной модели

Структура модели на первом этапе рассмотрена в работе [6]. На рис. 2 представлена блок-схема второй ступени диагностики.



Рис. 2. Блок-схема модели второй ступени диагностики

Вторая ступень диагностики включает три основных функциональных блока: 1) блок генерации зондирующего сигнала; 2) блок моделирования среды распространения; 3) блок обработки данных. Блок генерации сигнала выполняет формирование зондирующих диагностических радиоимпульсов. Выполнен данный блок в программной среде MATLAB. Входные данные, задаваемые в этом блоке:

- U амплитуда сигнала, 1 B;
- вид модуляции: в данном имитационном эксперименте была выбрана FSKмодуляция.

Входные данные для M-FSK модуляции (библиотека, задаваемая в MATLAB fskmod):

- NT тестовая битовая последовательность (при моделировании длина последовательности выбиралась равной 1000 символов);
- M общее количество возможных передаваемых символов (в данном случае M = 2 для двоичной FSK);
- f_c центральная несущая частота передатчика, 50 кГц;
- *Т* длительность радиоимпульса, соответствующая времени передачи одного символа, 0.1 мс;
- f_s частота дискретизации, 1 МГц.

Математическая модель частотно-манипулированного радиоимпульса записывается следующим образом [7,8]:

$$s_m(t) = \operatorname{Re}[s_{ml}(t)\exp(j2\pi f_c t)] = U\cos(2\pi f_c t + 2\pi f_m t), \quad 1 \le m \le M, \quad 0 \le t \le T,$$

где

$$_{ml}(t) = U \exp(j2\pi\Delta f t), \quad 1 \le m \le M, \quad 0 \le t \le T,$$
(1)

 f_m – частота, соответствующая m-му символу. Для логического 0: $f_1=f_c-\Delta f$, а для логической 1: $f_2=f_c+\Delta f$.

Величина частотного сдвига между двумя уровнями FSK-сигнала определяется как

$$\Delta f = f_1 - f_2$$

Минимальное значение Δf , при котором сигналы остаются ортогональными:

$$\Delta f = \frac{1}{2T}.$$

На выходе мы получаем сигнал с двоичной FSK-модуляцией, который поступает в блок среды распространения (этот блок также используется на первом этапе диагностики). Блок среды распространения состоит из блока линии электропередач и блока регистрации и записи результатов моделирования.

Моделирование блока линии электропередач с разветвленной топологией реализован в программной среде PSCAD/EMTDC с использованием специального компонента «T-Line» [9]. В работе используется фазовая частотно-зависимая модель ЛЭП [10,11], учитывающая взаимные влияния между линиями постоянного и переменного токов. Реализованная модель позволяет проводить исследования электролиний с произвольной топологией (от линейных до сколь угодно разветвленных).

Входные данные, задаваемые в этом блоке:

- топология линии;
- вид повреждения (короткие замыкания, междуфазные замыкания, обрывы фаз);

- L_0 расстояние до места повреждения, км;
- *l* длина линии, км;
- l_{OTB} длина ответвления, км.

Также задаются такие специфические характеристики ЛЭП, как марка провода – AC120/19; количество фаз – 3; геометрический параметр расположения каждого проводника – треугольный; характеристическое сопротивление линейного тракта для присоединения фаза–земля $Z_{\rm JTT}$, 450 Ом; удельное сопротивление земли $\rho_{\rm g}$, 100 Ом·м; тип опоры – ПС10П14AM.

Ослабление сигнала при передаче по воздушным линиям определяется по формуле

$$A = \alpha_1 l + \alpha_{\text{доп}},$$

где α_1 – коэффициент ослабления в трехпроводных несимметричных линиях:

$$\alpha_1 = (K_{11}K_3\sqrt{f} + K_{21}K_4f) \times 10^{-3},$$

 K_{11} , K_{21} , K_3 и K_4 – коэффициенты ослабления, учитывающие потери в проводах; определяемые маркой провода K_{11} , расположением проводов и типом опоры K_{21} , и числом проводов в расщепленной фазе (K_3 и K_4), которые приведены в табличных данных [12, 13].

Дополнительное ослабление

$$\alpha_{\rm доп} = \alpha_{\rm доп1} + \alpha_{\rm отв},$$

где $\alpha_{\text{доп1}}$ определяется для воздушных линий без учета ответвления согласно формуле

$$\alpha_{\rm gon1} = 20 \log \left(\frac{1}{C_1}\right),$$

в которой значение коэффициента C_1 , характеризующего расположение проводников, приведено в табличных данных [12,13].

 $\alpha_{\text{отв}}$ – дополнительное затухание, обусловленное ответвлением

$$\alpha_{\rm otb} = 20 \log \left| \frac{1}{T_{\rm otb}} \right|,$$

 $T_{\rm отв}$ – коэффициент передачи через место ответвления напряжения падающей волны основной для данного тракта модальной составляющей. Значение $T_{\rm отв}$ зависит от схемы обработки ответвления, параметров линии, нагрузки на конце ответвления и места включения ответвления:

$$\frac{1}{T_{\text{отв}}} = \left(1 + \frac{j}{2}\tan(\psi)\right),$$

$$\psi = \beta l_{\text{OTB}} - \arctan\left(\frac{K_4 Z_{\pi\text{T}}}{380}\right) + \frac{\pi}{2},$$

где

$$\beta = \frac{2\pi f}{300} + K_4 K_{51}'$$

коэффициенты K_4 , K'_{51} определяются согласно табличным значениям в [12, 13], которые характеризуются типом опоры, расположением проводов и номиналом напряжения в линии. Таким образом, на выходе мы получаем выражение для сигнала на приемном конце с учетом ослабления:

$$r(t) = s_m(t) \times 10^{-A/20},$$

после чего мы записываем r(t) в файл и передаем записанный сигнал в блок обработки данных.

Блок обработки данных состоит из блока демодуляции сигнала и блока вычисления вероятности битовой ошибки. На входе блока демодуляции сигнала мы получаем принятый сигнал r(t). Входные параметры для демодулятора, задаваемые в MATLAB библиотеке fskdemod:

- r(t) принятый сигнал;
- M общее количество возможных передаваемых символов (в данном случае M = 2 для двоичной FSK);
- f_c центральная несущая частота передатчика, 50 кГц;
- *Т* длительность радиоимпульса, соответствующая времени передачи одного символа, 0.1 мс;
- f_s частота дискретизации, 1 МГц.

Демодуляция реализуется в соответствии с работой [14]. Для каждой частоты вычисляется величина

$$R_m = \arg \max_{1 \le m \le M} \left(\sum_{t=0}^T r(t) \cos(2\pi f_m t) \right), \tag{2}$$

где t принимает значения 0, Δt , $2\Delta t$, ..., T; Δt – шаг дискретизации времени, обычно задается как

$$\Delta t = \frac{1}{f_s}.\tag{3}$$

Решение о том, какой символ был принят, принимается на основе сравнения суммарных произведений на двух различных частотах f_m . Если $R_1 > R_2$, то считается, что принят символ 0, в противном случае – символ 1.

На выходе мы получаем выходную битовую последовательность NR, которая после поступает в блок для вычисления вероятности битовой ошибки P_b . В блоке вычисление вероятности битовой ошибки P_b осуществляется путём сравнения выходной битовой последовательности NR с тестовой NT.

В ходе имитационного эксперимента оценивается значение P_{bf} при заданном повреждении, после чего сравнивается с эталонным значением P_{bnf} , вычисленным в отсутствии повреждений. По увеличению P_{bf} выявляется поврежденный участок сети. По сути, отношением P_{bf} к P_{bnf} характеризуется показатель надёжности диагностики: $h = P_{bf}/P_{bnf}$.

В данной статье представлены результаты моделирования ЛЭП в древовидных сетях с прямолинейной структурой без отпаек, ЛЭП с одной отпайкой, с двумя отпайками и тремя отпайками. В каждом случае моделируются различные типы повреждений такие, как обрыв фазы, короткое замыкание на землю и межфазные короткие замыкания.

На первом этапе моделирования определяется расстояние L до места повреждения и точность определения этого расстояния $\Delta L : \Delta L = |L - L_0|$. Величина L получается путем усреднения по 100 модельным рефлектограммам.

На втором этапе моделирования производится уточнение, на каком сегменте сети произошло повреждение.

3. Результаты моделирования

В данной статье сделан упор на второй этап системы диагностики. Но для полного представления работы системы диагностики приведены результаты моделирования на первом этапе, которые представляют собой значения средней ошибки измерения расстояния до повреждения ΔL при заданных характеристиках приемо-передающей аппаратуры. Параметры сигнала: амплитуда – 1 В, длительность импульса – 5 мкс. Расстояние от RX1 до места повреждения во всех случаях $L_0 = 30$ км. Таким образом, затухание во всех случаях одинаково, а уровень шума будет отличаться из-за различного числа отпаек.

Прямолинейная ЛЭП без ответвлений представляет собой объект с наименьшим уровнем помех, в которой нет явления переотражений. Результаты моделирования на первом этапе для различных видов повреждений: ΔL – от 0.001 до 0.003 км. Так как ответвлений нет, то второй этап диагностики не проводился.

Топология ЛЭП и результаты моделирования системы с одной отпайкой представлены на рис. 3.



Рис. 3. Топология ЛЭП с одной отпайкой

Результаты моделирования на первом этапе для различных видов повреждений: ΔL – от 0.13 до 0.16 км.

На гистограммах рис. 4 приведен уровень битовой ошибки. Пунктирной линией представлен уровень ошибок P_{bnf} в диагностической сети, зарегистрированный в ЛЭП без повреждения. Реализована следующая информационная сеть: RX1 \leftrightarrow RX2, RX2 \leftrightarrow RX3, RX3 \leftrightarrow RX1. При обрыве фазы A, к которой подключен модем, в каналах связи, связанных с RX3, уровень ошибок значительно выше, чем в канале RX1 \leftrightarrow RX2, где показатель надёжности h = 24.3. При обрыве фаз B и C это превышение не так выражено (h = 1.8), но повреждение хорошо локализуется. То же самое можно сказать о результатах, полученных при двухфазных и трехфазных обрывах, у которых h = 26.9 для двух фаз (A и B, A и C), а для трёх фаз (A и B и C) h = 47.9. Аналогичная картина наблюдается при коротком замыкании на землю и межфазных замыканиях.



Информационная сеть: RX1 <--> RX2, RX2 <--> RX3, RX3 <--> RX1

Рис. 4. Результаты моделирования ЛЭП с одной отпайкой

Топология ЛЭП и результаты моделирования системы с двумя отпайками представлены на рис. 5. Повреждение имитируется на сегменте RX4 на расстоянии 30 км от RX1. Результаты моделирования ошибки измерения расстояния до повреждения на первом этапе для различных видов повреждений: ΔL – от 0.29 до 0.36 км.

На гистограммах рис. 6 приведен уровень битовой ошибки. Реализована следующая информационная сеть: RX1↔RX2, RX2↔RX3, RX3↔RX4, RX1↔RX4. При обрыве фазы A, к которой подключен модем, в каналах связи, связанных с RX4, уровень ошибок значительно выше, чем в каналах, не связанных с RX4, и показатель h = 6.3. При обрыве фаз В и С это превышение не так выражено (показатель h = 3.4), но повреждение хорошо локализуется. То же самое можно сказать о результатах, полученных при двухфазных и трехфазных обрывах. Здесь показатель надежности при двухфазных повреждениях (А и В, А и С) h = 12.5, а для трех фаз (А и В и С) составляет 26.2. Аналогичная картина наблюдается при коротком замыкании на землю и межфазных замыканиях.



Рис. 5. Топология ЛЭП с одной отпайкой

Топология ЛЭП и результаты моделирования системы с тремя отпайками представлены на рис. 1. Повреждение моделируется на сегменте RX4. Ошибки измерения расстояния до повреждения на первом этапе для различных видов повреждений меняются от 1.02 до 1.04 км.

На рис. 7 представлены шесть групп результатов: обрыв фазы A, обрыв фазы B, обрыв фазы C, обрыв пары фаз A и B, A и C, B и C и обрыв трех фаз ABC. В каждой группе приведены измерения битовой ошибки по шести каналам связи: RX1 \leftrightarrow RX2, RX2 \leftrightarrow RX3, RX3 \leftrightarrow RX4, RX4 \leftrightarrow RX5, RX5 \leftrightarrow RX1. Как мы видим, каждый сегмент дает напрямую вклад в два канала связи (но есть влияние и других каналов).

Для однофазных обрывов однозначно правильно определяется сегмент RX4, который дает основной вклад в третий и четвертый столбцы. При этом показатель надёжности h = 6.5. В случае обрыва фаз В и С сегмент с повреждением определяется однозначно, но уровень ошибок и, соответственно, надежность выводов ниже, показатель надёжности h = 2.1. При коротком замыкании на землю представленные тенденции сохраняются, но выражены несколько слабее (h = 1.4). При межфазных замыканиях фаз В и С определить нужный сегмент не удается и h = 0.8.



Информационная сеть: RX1 <--> RX2, RX2 <--> RX3, RX3 <--> RX4, RX4 <--> RX1

Рис. 6. Результаты моделирования ЛЭП с двумя отпайками

Заключение

Разработана имитационная компьютерная модель двухступенчатой системы диагностики ЛЭП с древовидной структурой. В модели реализована работа локатора, с помощью которого определяется расстояние до места повреждения, и модель диагностической информационной системы, на основе которой реализуется определение сегмента, где произошло повреждение.

Результаты моделирования позволяют надеяться, что предлагаемая двухступенчатая модель позволит использовать радиолокационный метод для диагностики не только ЛЭП без ответвлений, но и ЛЭП с древовидной структурой.



Информационная сеть: RX1 <--> RX2, RX2 <--> RX3, RX3 <--> RX4, RX4 <--> RX5, RX5 <--> RX1

Рис. 7. Результаты моделирования ЛЭП с тремя отпайками

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Bani Ahmad A.Y.A., William P., Uike D., Murgai A., Bajaj K.K., Deepak A., Shrivastava A. Framework for sustainable energy management using smart grid panels integrated with machine learning and IOT based approach // Int. J. Intell. Syst. Appl. Eng. 2024. V. 12, No 2s. P. 581–590.
- Bishnoi D., Chaturvedi H. A review on emerging trends in smart grid energy management systems // Int. J. Renewable Energy Res. 2021. V. 11, No 3. P. 952–966. https://doi.org/10.20508/ijrer.v11i3.11832.g8228.

- Gungor V.C., Sahin D., Kocak T., Ergut S., Buccella C., Cecati C. Smart grid technologies: Communication technologies and standards // IEEE Trans. Ind. Inf. 2011. V. 7, No 4. P. 529–539. https://doi.org/10.1109/TII.2011.2166794.
- Shagiev R.I., Karpov A.V., Kalabanov S.A. The model of the power line's fault location method using time domain reflectometry // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 803. Art. 012137. https://doi.org/10.1088/1742-6596/803/1/012137.
- Shagiev R.I., Karpov A.V., Kalabanov S.A. A method of fault location detection on branched power transmission lines // J. Electr. Eng. 2019. V. 90, No 2. P. 135–139. https://doi.org/10.3103/S106837121902010X.
- Karpov A., Sarychev A., Kalabanov S. Computer model of "smart grid" for power transmission lines with tree-like topology // Proc. 2023 Int. Russ. Smart Ind. Conf. (SmartIndustryCon). Sochi: IEEE Xplore, 2023. P. 600–605. https://doi.org/10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110719.
- Proakis J.G., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2001. 1150 p.
- Watson B. FSK: Signals and demodulation // Watkins–Johnson Tech-Notes. 1980. V. 7, No 5. P. 1–15.
- 9. Manitoba HVDC Research Centre. User's Guide on the Use of PSCAD. Winnipeg, 2010. 492 p. URL:

 $https://hvdc.ca/uploads/ck/files/reference_material/PSCAD_User_Guide_v4_3_1.pdf.$

- Gustavsen B., Irwin G., Mangelrød R., Brandt D., Kent K. Transmission line models for the simulation of interaction phenomena between parallel AC and DC overhead lines // Proc. IPST'99 — Int. Conf. on Power Systems Transients. Budapest, 1999. Art. 99IPST002-1.5. P. 61–67.
- Morched A., Gustavsen B., Tartibi M. A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables // IEEE Trans. Power Delivery. 1999. V. 14, No 3. P. 1032–1038. https://doi.org/10.1109/61.772350.
- Стандарт организации ОАО «РОССЕТИ» СТО 56947007-33.060.40.322-2022. Руководящие указания по расчету параметров и выбору схем высокочастотных каналов связи по линиям электропередачи переменного тока 35–750 кВ [Текст]. М.: Отраслевой стандарт ОАО «РОССЕТИ», 2022. 87 с.
- Стандарт организации ОАО «РОССЕТИ» СТО 56947007-33.060.40.052-2010. Методические указания по расчету параметров и выбору схем высокочастотных трактов по линиям электропередачи 35–750 кВ переменного тока [Текст]. М.: Отраслевой стандарт ОАО «РОССЕТИ», 2010. 49 с.
- 14. Simon M.K., Alouini M.S. Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis. 1st ed. New York, NY: Wiley, 2000. xix, 544 p.

Поступила в редакцию 30.05.2024 Принята к публикации 12.09.2024

Карпов Аркадий Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики

Казанский (Приволжский) федеральный университет ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия E-mail: arkadi.karpov@kpfu.ru

Сарычев Дмитрий Валерьевич, аспирант кафедры радиофизики

Казанский (Приволжский) федеральный университет ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия

E-mail: sarychev1607.@gmail.com

ISSN 2541–7746 (Print) ISSN 2500–2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI (Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2024, vol. 166, no. 4, pp. 518-531

ORIGINAL ARTICLE doi: 10.26907/2541-7746.2024.4.518-531

> Computer Model of a Two-Stage Diagnostic System for Power Transmission Lines with Tree Topology

> > A.V. Karpov^{*}, D.V. Sarychev^{**}

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia E-mail: *arkadi.karpov@kpfu.ru, **sarychev1607.@gmail.com

Received May 30, 2024; Accepted September 12, 2024

Abstract

A computer model of a two-stage system for locating faults by analyzing reflected signals was developed. The simulation results for power transmission lines with varying numbers of branches extending from the main line were discussed. The relationship between fault location efficiency and the network bit error rate was analyzed. The dependence of diagnostic reliability on the number of branches and fault types was examined.

Keywords: two-stage diagnostic system, power transmission line with tree topology, bit error, computer simulation, FSK modulation

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Figure Captions

- Fig. 1. Topology of a power transmission line with three branches.
- Fig. 2. Block diagram of the second diagnostic stage model.
- Fig. 3. Topology of a power transmission line with a single branch.
- Fig. 4. Simulation results for a power transmission line with a single branch.
- Fig. 5. Topology of a power transmission line with a single branch.
- Fig. 6. Simulation results for a power transmission line with two branches.

Fig. 7. Simulation results for a power transmission line with three branches.

References

- Bani Ahmad A.Y.A., William P., Uike D., Murgai A., Bajaj K.K., Deepak A., Shrivastava A. Framework for sustainable energy management using smart grid panels integrated with machine learning and IOT based approach. *Int. J. Intell. Syst. Appl. Eng.*, 2024, vol. 12, no. 2s, pp. 581–590.
- Bishnoi D., Chaturvedi H. A review on emerging trends in smart grid energy management systems. Int. J. Renewable Energy Res., 2021, vol. 11, no. 3, pp. 952–966. https://doi.org/10.20508/ijrer.v11i3.11832.g8228.
- Gungor V.C., Sahin D., Kocak T., Ergut S., Buccella C., Cecati C. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Trans. Ind. Inf.*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 529–539. https://doi.org/10.1109/TII.2011.2166794.

- Shagiev R.I., Karpov A.V., Kalabanov S.A. The model of the power line's fault location method using time domain reflectometry. J. Phys.: Conf. Ser., 2017, vol. 803, art. 012137. https://doi.org/10.1088/1742-6596/803/1/012137.
- Shagiev R.I., Karpov A.V., Kalabanov S.A. A method of fault location detection on branched power transmission lines. J. Electr. Eng., 2019, vol. 90, no. 2, pp. 135–139. https://doi.org/10.3103/S106837121902010X.
- Karpov A., Sarychev A., Kalabanov S. Computer model of "Smart Grid" for power transmission lines with tree-like topology. Proc. 2023 Int. Russ. Smart Ind. Conf. (SmartIndustryCon). Sochi, IEEE Xplore, 2023, pp. 600–605. https://doi.org/10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110719.
- Proakis J.G., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2001. 1150 p.
- Watson B. FSK: Signals and demodulation. Watkins-Johnson Tech-Notes, 1980, vol. 7, no. 5, pp. 1–15.
- Manitoba HVDC Research Centre. User's Guide on the Use of PSCAD. Winnipeg, 2010. 492 p. URL: https://hvdc.ca/uploads/ck/files/reference material/PSCAD User Guide v4 3 1.pdf.
- Gustavsen B., Irwin G., Mangelrød R., Brandt D., Kent K. Transmission line models for the simulation of interaction phenomena between parallel AC and DC overhead lines. *Proc. IPST'99 - Int. Conf. on Power Systems Transients.* Budapest, 1999, art. 99IPST002-1.5, pp. 61–68.
- Morched A., Gustavsen B., Tartibi M. A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables. *IEEE Trans. Power Delivery*, 1999, vol. 14, no. 3, pp. 1032–1038. https://doi.org/10.1109/61.772350.
- 12. Corporate Standard of OAO ROSSETI. STO 56947007-33.060.40.322-2022. Guidelines for calculating parameters and selecting high-frequency channels on 35–750 kV AC transmission lines. Moscow, Otrasl. Stand. OAO "ROSSETI", 2022. 87 p. (In Russian)
- Corporate Standard of OAO ROSSETI. STO 56947007-33.060.40.052-2010. Methodical Guidelines for calculating parameters and selecting schemes of high-frequency paths on 35–750 kV AC transmission lines. Moscow, Otrasl. Stand. OAO "ROSSETI", 2010. 49 p. (In Russian)
- 14. Simon M.K., Alouini M.S. Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis. 1st ed. New York, NY, Wiley, 2000. xix, 544 p.

Для цитирования: Карпов А.В., Сарычев Д.В. Компьютерная модель двухступенчатой системы диагностики ЛЭП с древовидной топологией // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2024. Т. 166, кн. 4. С. 518–531. https://doi.org/10.26907/2541-7746.2024.4.518-531.

For citation: Karpov A.V., Sarychev D.V. Computer model of a two-stage diagnostic system for power transmission lines with tree topology. Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki, 2024, vol. 166, no. 4, pp. 518–531. https://doi.org/10.26907/2541-7746.2024.4.518-531. (In Russian)