

УДК 621.315

Математические модели кабельных линий электропередачи для использования в системах поиска места их повреждения

Логунов Андрей Владимирович

Шлык Юрий Константинович (научный руководитель)

ТИУ, Тюмень, Россия

Решение задачи определения места повреждения кабельных линий электропередачи неразрывно связано с математическим моделированием. Рассмотрены основные особенности построения математических моделей кабельных линий электропередач, которые входят в алгоритмы дистанционных методов определения места их повреждения. Проанализированы особенности различных вариантов моделирования. Предложена модель кабельной линии с повреждением на основе теории пассивных четырехполюсников, которая может использоваться в системах поиска поврежденных кабелей дистанционного типа.

Ключевые слова: математическая модель, кабельная линия, определение места повреждения, четырехполюсник, цепная схема

Введение. Решение сложных технических задач методами математического моделирования является одним из важнейших инструментов современной электроэнергетической отрасли, обеспечивающих ее развитие. Среди прочих не теряет своей актуальности задача определения места повреждения (ОМП) в линиях электропередачи. Для ее решения эксплуатирующие электросетевые организации чаще всего используют приборы и устройства, работа которых основана на применении дистанционных методов и алгоритмов [1–3]. Они, в свою очередь, базируются на расчетах с использованием математических моделей кабельных линий. Выбор той или иной модели для различных вариантов конфигурации кабельной линии и повреждения оказывает значительное влияние на точность определения его координаты.

Теория. В общем случае электрические линии характеризуются тем, что при прохождении по ним электрической энергии, напряжение и ток в них изменяются от точки к точке. Это обусловлено падением напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях и утечкой тока через емкость и проводимость изоляции [4]. Так как основные первичные параметры линии распределены равномерно вдоль ее длины, такие линии принято называть цепью с распределенными параметрами. Кабельные линии переменного тока не являются исключением.

Для упрощения расчетов на практике пользуются схемами замещения электрических линий, которые являясь приближенной моделью, влияют на точность расчетов. Выбор конкретной схемы зависит от параметров и конфигурации линии. На бесконечно малом участке линии, схема замещения которого представлена на рис. 1, параметры линии можно считать сосредоточенными.

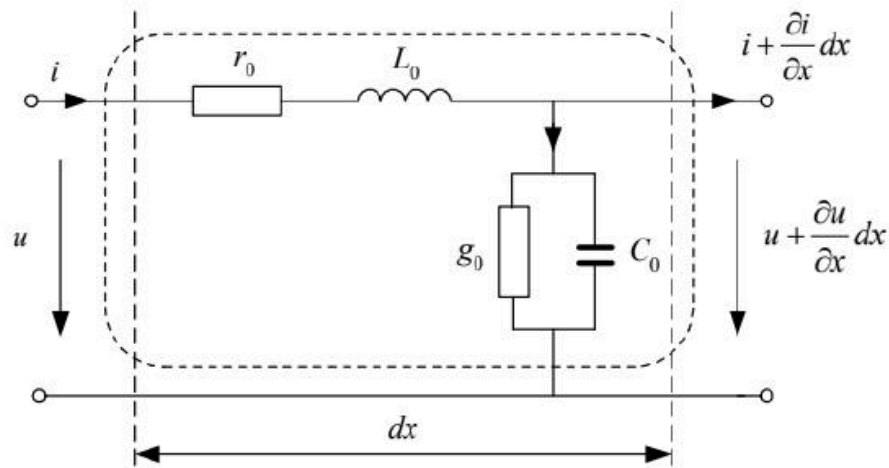


Рис. 1. Схема замещения бесконечно малого участка линии

Электромагнитные процессы в таком случае описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, а при переходе к комплексным значениям функций можно получить систему уравнений длинной линии или телеграфные уравнения [4]

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cdot \operatorname{ch}(\gamma l) + \dot{I}_2 \cdot Z_{\text{в}} \cdot \operatorname{sh}(\gamma l); \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{Z_{\text{в}}} \cdot \operatorname{sh}(\gamma l) + \dot{I}_2 \cdot \operatorname{ch}(\gamma l), \end{cases} \quad (1)$$

где $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ — комплексные значения напряжения в начале и конце линии; $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ — комплексные значения тока в начале и конце линии; $Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}$ — волновое сопротивление линии; sh , ch — гиперболические функции синус и косинус; $\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta$ — постоянная передачи линии; l — длина линии.

В некоторых случаях для упрощения пользуются моделями идеальной линии, в которой активные параметры принимаются равными нулю. Однако такое допущение может быть корректно только для линий сверхвысокого напряжения.

Учитывая, что модели с сосредоточенными параметрами не позволяют в полной мере описать процессы в реальной линии, наиболее предпочтительным вариантом для задачи определения места повреждения в кабельных линиях остается модель длинной линии.

Решение данной задачи также может быть получено в рамках замены электрической линии эквивалентным пассивным симметричным четырехполюсником, процессы в котором описываются уравнениями А-формы:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A \cdot \dot{U}_2 + B \cdot \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = C \cdot \dot{U}_2 + D \cdot \dot{I}_2, \end{cases} \quad (2)$$

где A, B, C, D — комплексные первичные параметры четырехполюсника.

На предыдущем этапе исследований была получена модель кабельной линии с повреждением, которая представлена цепной схемой с переменной структурой [5]. Повреждение в ней моделировалось «аномальным» одноэлементным четырехполюсником. Перемещение такого четырехполюсника внутри цепной схемы меняет ее топологию, что отражается на коэффициентах эквивалентного четырехполюсника, входящих в выражение (2). Определение этих коэффициентов возможно из опытов холостого хода и короткого замыкания. При этом изменение вторичных параметров четырехполюсника также лежит в прямой зависимости от координаты повреждения в линии. Полученный в рамках решения числового примера график функции относительного рассогласования характеристических сопротивлений четырехполюсника позволяет однозначно определить место повреждения в линии (рис. 2).

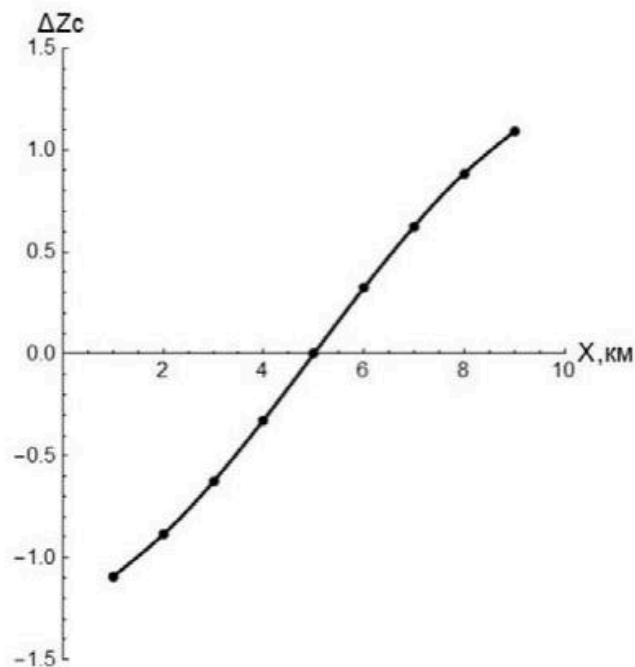


Рис. 2. График функции относительного рассогласования $\Delta Z_c(X)$

Закключение. Предложенная математическая модель кабельной линии с повреждением позволяет определять координату этого повреждения на основе замера комплексных входных сопротивлений линии и может использоваться в системах ОМП дистанционного типа. Необходима проверка теоретической модели в рамках экспериментальных исследований

Литература

- [1] Аржанников Е.А., Чухин А.М. *Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи*. Москва, Энергопресс, 1998, 87 с.
- [2] Шалыт Г.М. *Определение мест повреждения в электрических сетях*. Москва, Энергоиздат, 1982, 312 с.

- [3] Шлык Ю.К., Логунов А.В. *Способ определения места повреждения кабельной электрической линии*. Патент № 2782962 РФ, 2022, бюл. № 28, 5 с.
- [4] Атабеков Г.И. *Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи*. Москва, Энергия, 1970, 592 с.
- [5] Логунов А.В., Шлык Ю.К. Разработка модели кабельной линии с повреждением на основе теории четырехполюсников с переменной топологией. *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*, 2023, т. 66, № 3, с. 48–54.

Mathematical models of cable transmission lines for use in fault locating systems

Logunov Andrey Vladimirovich

Shlyk Yuriy Konstantinovich (*scientific advisor*)

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Solving the problem of determining the location of damage to cable power lines is inextricably linked with mathematical modeling. The main features of building mathematical models of cable power lines, which are included in the algorithms of remote methods for determining the place of their damage, are considered. Advantages and disadvantages of various modeling options are analyzed. A damaged cable line model is proposed based on the theory of passive four-terminal cables, which can be used in systems for searching for damage to remote-type cables.

Keywords: mathematical model, cable line, fault location, four-terminal, circuit diagram