

4.3.2. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 621.311.24

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_4_138

EDN: CDOLUB

Исследование феррорезонанса в электрических сетях напряжения 10 кВ

Дмитрий Николаевич Афоничев^{1✉}, Сергей Николаевич Пиляев²,
Владимир Владимирович Картавец³

^{1, 2, 3} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
Воронеж, Россия

¹ dmafonichev@yandex.ru✉

Аннотация. Сельскохозяйственные распределительные сети напряжения 10 кВ представляют собой пример феррорезонансной цепи, поскольку включают в себя большое количество индуктивностей с нелинейной кривой насыщения (силовые трансформаторы, трансформаторы для измерения напряжения, шунтирующие реакторы), а также емкостные элементы в виде длинных линий, конденсаторов повышения коэффициента мощности на трансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ, дугогасительных и фильтрующих элементов коммутационных аппаратов и др. Реализовано построение модели сети с учетом эффекта насыщения магнитной цепи в среде программного комплекса SimInTech для исследования реакции сети на возможные аварийные ситуации. Основой модели является схема замещения, в которой трансформатор 10/0,4 кВ и нагрузка представлены в виде эквивалентных индуктивностей и активных сопротивлений, сопротивление контура заземления нагрузки – соответствующим резистором, линия электропередачи – в виде активного сопротивления и индуктивности. Задание и отображение всех параметров элементов модели осуществляются с помощью такого инструмента SimInTech, как скрипт, под которым подразумевается программа на языке высокого уровня, которая позволяет осуществлять любые манипуляции с объектами модели. Результаты моделирования нормального режима работы электрической сети 10 кВ, короткого замыкания и обрыва одной из фаз сети показали, что при коротком замыкании, а также в случае обрыва одной из фаз в цепи первичной обмотки трансформатора напряжения наблюдаются феррорезонансные явления, которые приводят к большим значениям токов и отказу трансформатора. Предложенная методика моделирования режимов электрической сети 10 кВ позволяет проводить исследования переходных процессов в данных сетях, вызванных внешними воздействиями и при различных структурах сети. С помощью программного комплекса SimInTech, строя соответствующие модели, можно успешно решать задачи повышения надежности сельскохозяйственных электрических сетей путем рационального подбора их компонентов.

Ключевые слова: электрическая сеть, трансформатор, фаза, ток, нагрузка, схема замещения, феррорезонанс, моделирование

Для цитирования: Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Картавец В.В. Исследование феррорезонанса в электрических сетях напряжения 10 кВ // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 4(79). С. 138–146. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_4_138-146.

4.3.2. ELECTROTECHNICS, ELECTRICAL EQUIPMENT AND ELECTRICAL POWER SUPPLY FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Investigation of ferro-resonance in 10 kV voltage electrical networks

Dmitry N. Afonichev^{1✉}, Sergey N. Pilyaev², Vladimir V. Kartavtsev³

^{1, 2, 3} Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

¹ dmafonichev@yandex.ru✉

Abstract. Distribution networks with a voltage of 10 kV used in agriculture are an example of a ferro-resonance circuit, since they include a large number of inductors with a nonlinear saturation curve (power transformers, voltage measuring transformers, shunt reactors), as well as capacitive elements in the form of long lines, capacitors for increasing the power factor at transformer substations of 10/0.4 kV, arc-damping and filtering elements of switching devices, etc. The construction of a network model is implemented taking into account the saturation effect of the magnetic circuit in the environment of the SimInTech software package to study the network's response to possible emergencies. The basis of the model is a substitution connection in which a 10/0.4 kV transformer and the load are represented as equivalent inductances and active resistances, the resistance of the load grounding circuit is

represented by a corresponding resistor, the power line is also represented as an active resistance and inductance. Setting and displaying all parameters of the model elements is carried out using such SimInTech tool as script, which means a program written in a high-level language that allows performing any manipulations with model objects. The results of modeling normal operating mode of the 10 kV electrical network, short circuit and one-phase open fault in the SimInTech environment have shown that in the case of a short circuit, as well as in the case of one-phase open fault, in the circuit of the primary winding of the voltage transformer, ferro-resonance phenomena are observed, which lead to large values of currents contributing to the failure of the transformer. The proposed simulation method of the modes of the 10 kV electric networks allows conducting studies of transients in these networks caused by various external influences and with different network structures. By means of the SimInTech software package and by developing appropriate models, it is possible to successfully solve the problems of increasing the reliability of agricultural electrical networks through the rational selection of their components.

Keywords: electrical network, transformer, phase, current, load, substitution connection, ferro-resonance, simulation
For citation: Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Kartavtsev V.V. Investigation of ferro-resonance in 10 kV voltage electrical networks. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(4):138-146. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_4_138-146.

Введение

Одной из достаточно распространенных причин выхода из строя оборудования в сельскохозяйственных распределительных сетях напряжения 10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, является возникновение в них феррорезонансных процессов [1]. Из-за феррорезонансных процессов в сетях 10 кВ ежегодно повреждается порядка 6–8% установленных измерительных трансформаторов напряжения и около 1% силовых трансформаторов [7, 8].

В современной технической литературе под термином «феррорезонанс» обычно понимают широкий спектр резонансных взаимодействий и сложных колебательных процессов в электрических цепях при наличии в них емкостей и индуктивностей с ферромагнитными сердечниками [5]. Индуктивные элементы с ферромагнитным сердечником имеют нелинейную зависимость между их потокосцеплением и током, что вызвано насыщением стали магнитопровода. Таким образом, при любых изменениях параметров такой цепи (скачки напряжения питания, короткие замыкания, коммутационные процессы и др.) могут наблюдаться скачкообразные переходы состояния магнитопровода катушки индуктивности из режима слабого насыщения в сильно насыщенный и наоборот. Это вызывает соответствующее изменение коэффициента индуктивности катушки, приводящее к резонансу и, как следствие, к резким искажениям формы и амплитуды колебаний напряжения и тока в данной нелинейной катушке. В том случае, если изоляция обмотки такой катушки индуктивности не рассчитана на работу в данном режиме, то протекание через обмотку токов, превышающих предельно допустимые значения, может привести к разрушению изоляции обмотки и замыканиям между ее витками [3, 4, 7, 8].

Цель проведенных исследований заключалась в построении модели сети с учетом эффекта насыщения магнитной цепи в среде программного комплекса SimInTech для последующего анализа реакции сети на возможные аварийные ситуации.

Методика исследования

Сельскохозяйственные распределительные сети напряжения 10 кВ представляют собой пример феррорезонансной цепи, поскольку включают в себя большое количество индуктивностей с нелинейной кривой насыщения (силовые трансформаторы, трансформаторы для измерения напряжения, шунтирующие реакторы), а также емкостные элементы в виде длинных линий, конденсаторов повышения коэффициента мощности на трансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ, дугогасительных и фильтрующих элементов коммутационных аппаратов и др. Таким образом, в этих сетях возможно возникновение феррорезонансных явлений, которые приводят к серьезным повреждениям оборудования [1, 3, 4, 6]. Главной особенностью феррорезонансных процессов является

то, что они отсутствуют при нормальных режимах работы сети, но могут возникнуть, как правило, при различных авариях и при переходных процессах в сети (короткие замыкания, грозовые перенапряжения, включение/выключение трансформаторов или нагрузки и др.).

Аналитические исследования возможности появления феррорезонансных явлений в сельскохозяйственных сетях напряжением 10 кВ инженерными методами расчета электрических цепей весьма затруднены из-за нелинейностей характеристик ферромагнитных элементов и несинусоидальности токов и напряжений при возникновении данных процессов. Наиболее предпочтительным методом определения возможности появления феррорезонансных явлений в настоящее время является построение динамических компьютерных моделей конкретных сетей и исследование с их помощью реакции сети на возможные аварийные ситуации [6, 10].

Для создания компьютерных моделей различных мультифизических систем в последнее время широкое распространение получила отечественная разработка SimInTech [1, 9], имеющая ряд несомненных достоинств по сравнению с аналогичными зарубежными системами [10]. Рассмотрим построение модели сети с учетом эффекта насыщения магнитной цепи в среде программного комплекса SimInTech.

Можно построить модель конкретной сельскохозяйственной электрической сети с высокой степенью детализации, но для простоты представления выберем простейшую сеть, показанную на рисунке 1. Она состоит из трансформаторных подстанций 35/10 и 10/0,4 кВ, распределительной линии 10 кВ и нагрузки. В этой цепи присутствуют нелинейные индуктивности в виде силовых трансформаторов 35/10 и 10/0,4 кВ и измерительный трансформатор напряжения, который может быть подключен как на шинах подстанции 35/10 кВ, так и на подстанции 10/0,4 кВ. Примем допущение, что этот трансформатор подключен на шинах подстанции 35/10 кВ.

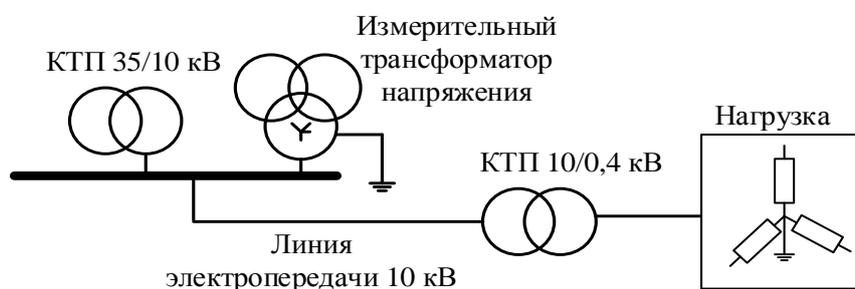


Рис. 1. Однолинейная схема сельскохозяйственной электрической сети

Компьютерная модель сети строится на основе принципиальной схемы замещения, при этом ее выбор обусловлен той причиной возникновения феррорезонансных процессов, возможность появления которой и является целью представленных исследований. Феррорезонансные процессы могут возникнуть при различных режимах работы сети и внешних воздействиях [7, 8]:

- при нормальных эксплуатационных режимах работы электрической сети в результате оперативных переключений на подстанциях;
- после ликвидации аварийного режима работы, например после действия автоматического повторного включения линий электропередачи или после действия дифференциальной защиты шин;
- при аварийных режимах работы, к которым относятся неполнофазные включения линий электропередачи и перемежающие дуговые замыкания на землю.

Для обеспечения возможности анализа каждого такого случая возникновения феррорезонансных явлений нужна соответствующая схема замещения и своя компью-

терная модель сети, которая позволит наиболее адекватно воспроизвести данную ситуацию. Как показал анализ исследований, проводимых по тематике феррорезонанса в сетях 10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, чаще всего феррорезонансные явления, приводящие к опасным перенапряжениям, возникают при дуговых замыканиях на землю и неполнофазных режимах работы сети. Именно из-за дуговых замыканий на землю и возникающих при этом феррорезонансных явлений наиболее часто происходят повреждения трансформаторов напряжения, разрядников и ограничителей напряжения [8]. Поэтому будем строить схему замещения электрической сети исходя из задачи воспроизведения неполнофазных режимов работы и различных видов замыканий на землю.

Наибольшую трудность в построении компьютерной модели сети представляет собой построение нелинейной модели трехфазного трансформатора с учетом реальной кривой намагничивания. Во всех системах моделирования, включая SimInTech, имеются только блоки трехфазных трансформаторов с постоянными параметрами [8, 10]. Нелинейный трехфазный трансформатор может быть с достаточной степенью точности представлен комбинацией трех однофазных трансформаторов. Поэтому для представления трехфазного трансформатора был разработан блок модели однофазного трансформатора с нелинейной кривой намагничивания, схема замещения которого приведена на рисунке 2. Эта схема основана на классической схеме замещения трансформатора [2]. Она включает в себя активные сопротивления первичной и вторичной обмоток R_1 , R_2 , а также их индуктивности рассеяния магнитных потоков L_1 , L_2 . Взаимная индуктивность L_m определяет магнитный поток Φ , протекающий по магнитопроводу, а активное сопротивление R_m определяет потери в стали. Для упрощения схемы потери в стали приняты постоянными ($R_m = const$). Идеальная модель трансформатора (без учета потерь) обеспечивает трансформацию напряжения, определяемую отношением числа витков первичной (W_1) и вторичной (W_2) обмоток. Поскольку зависимость амплитуды магнитного потока Φ от тока в первичной обмотке определяется кривой намагничивания стали магнитопровода, то значение индуктивности L_m является функцией тока первичной обмотки $L_m = f(i_1)$.

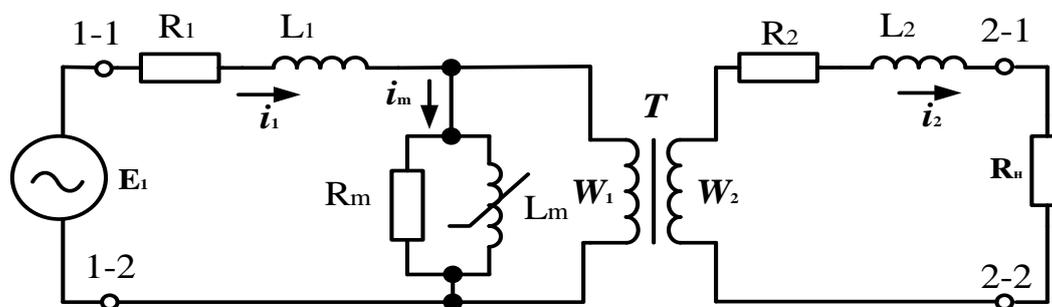


Рис. 2. Схема замещения нелинейного однофазного трансформатора

На рис. 3 показана разработанная на основе модели однофазного трансформатора модель нелинейного трехфазного трансформатора в виде блока субмодели, который можно использовать в различных моделях. Здесь для моделирования индуктивности L_m используется блок «Нелинейная индуктивность». Для сохранения физической сущности процесса трансформации переменного напряжения первичная и вторичная обмотки гальванически развязаны с помощью блока «Идеальный трансформатор», который осуществляет только преобразование напряжения и тока. В этом случае используется реальное, а не приведенное активное сопротивление и индуктивность рассеяния вторичной обмотки. В программном комплексе SimInTech параметры кривой намагничивания блока «Нелинейная индуктивность» можно задавать кусочно-линейно в виде двух векторов: вектора тока и соответствующего ему вектора потокосцепления.

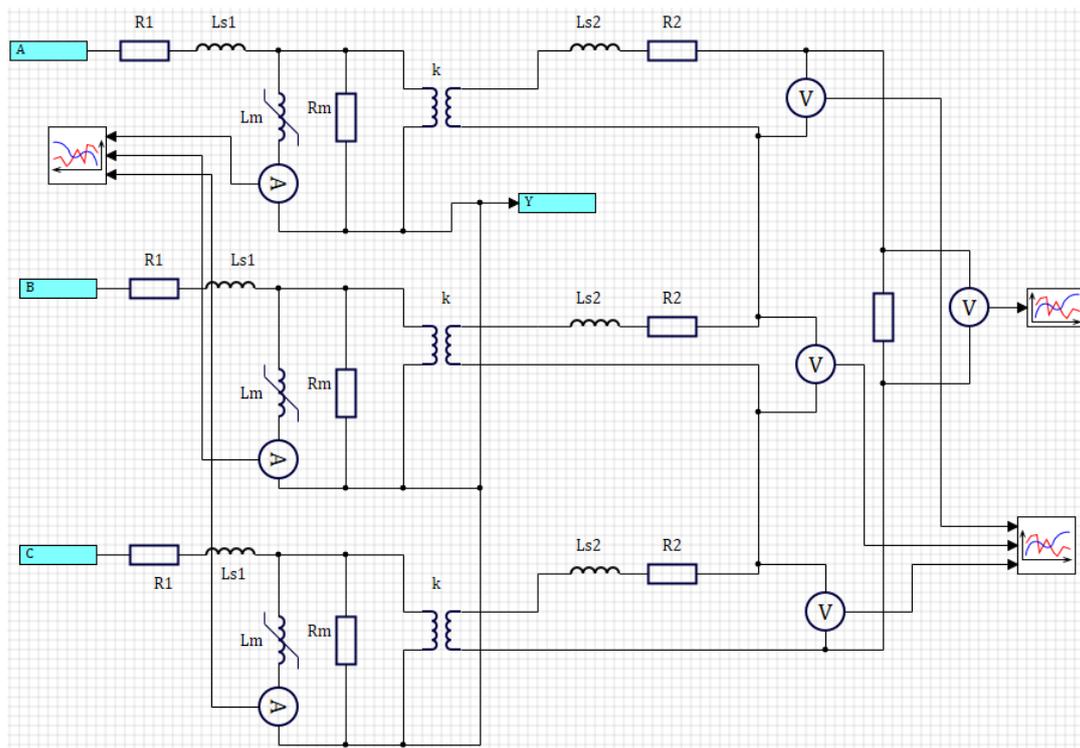


Рис. 3. Субмодель нелинейного трехфазного трансформатора

На рисунке 4 показаны справочная экспериментальная кривая потокоцепления трансформатора напряжения типа НТМИ на напряжение 10 000 В [7] и ее аппроксимация с помощью набора прямых. Из данного рисунка видно, что используемый набор прямых достаточно точно соответствует реальной кривой.

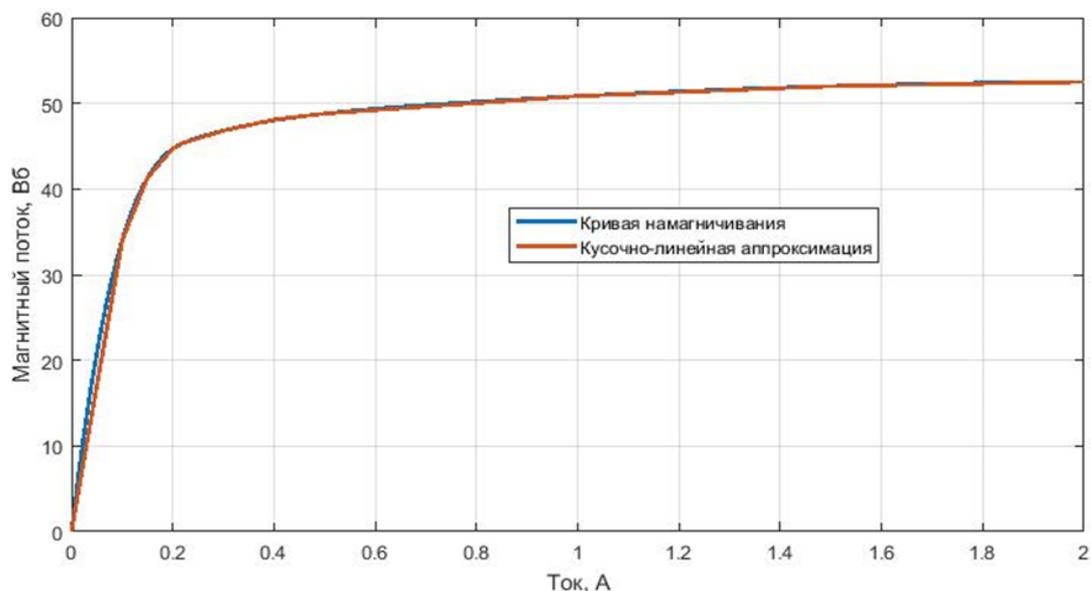


Рис. 4. Кривая потокоцепления трансформатора напряжения

Исходя из принятой основной цели моделирования, заключающейся в исследовании влияния переходных процессов при коротких замыканиях на линии электропередачи и при неполнофазном режиме работы сети на измерительный трансформатор напряжения, представим схему замещения сети, приведенную на рисунке 1, в том виде, в котором она изображена на рисунке 5.

Здесь для решения поставленной задачи исследования допустимо представить трансформатор 10/0,4 кВ и нагрузку в виде эквивалентных индуктивностей и активных сопротивлений L_n, R_n . Сопротивление контура заземления нагрузки представлено соответствующим резистором R_3 . Линия электропередачи также представлена в виде активного сопротивления R_l и индуктивности L_l . Емкости C_l и C_ϕ соответствуют емкостям линии относительно земли и межфазовым емкостям, причем $C_\phi = 0,33 C_l$. Имитация замыкания на землю осуществляется с помощью ключа K_1 , который может включаться на любую фазу. Сопротивление $R_{кз}$ имитирует сопротивление дуги и сопротивление растекания тока в земле. В общем виде сопротивление может быть как переменным, так и постоянным. Неполнофазный режим работы сети может быть воспроизведен с помощью соответствующих ключей в линиях.

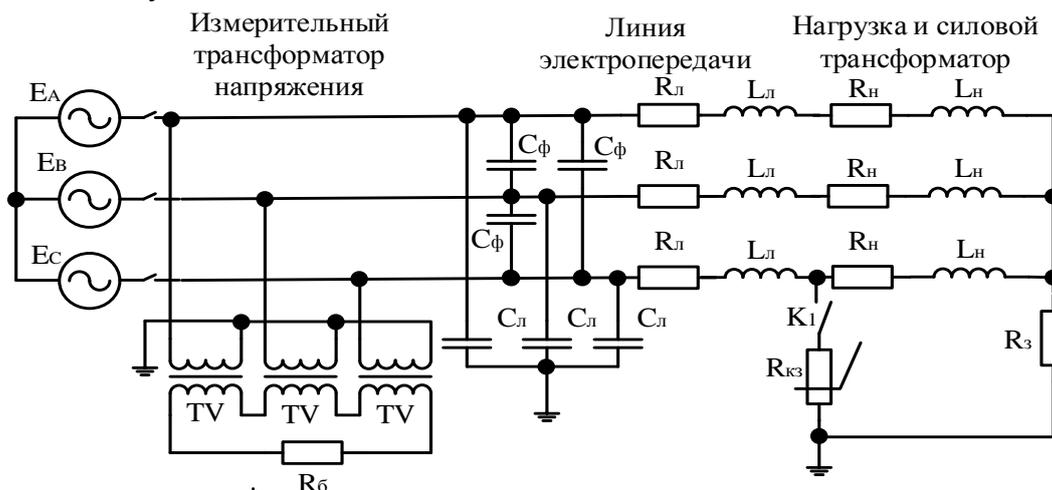


Рис. 5. Схема замещения сельскохозяйственной электрической сети

На рисунке 6 приведена модель сети, построенная на основании схемы замещения (рис. 5) в SimInTech.

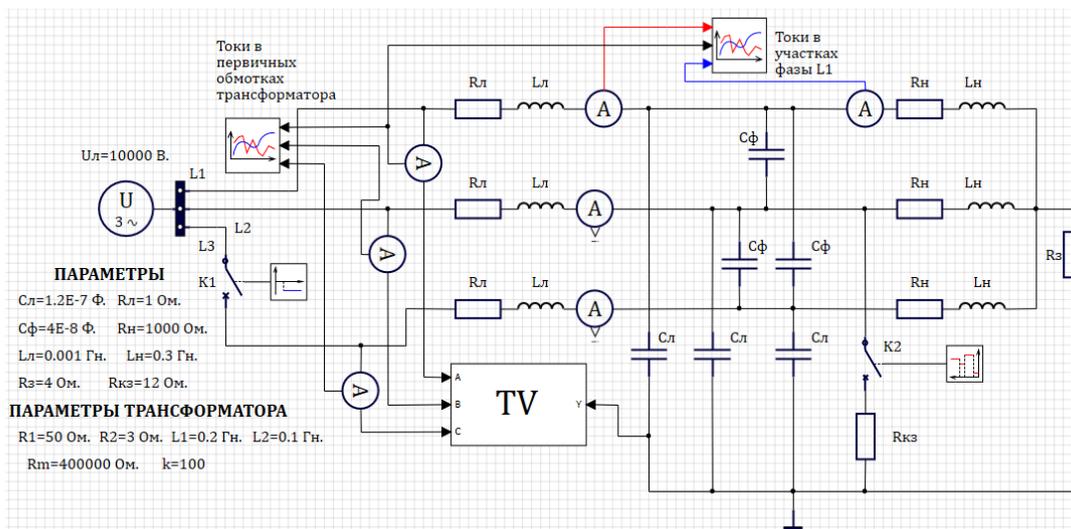


Рис. 6. Модель сети в среде SimInTech

Трансформатор напряжения на рисунке 6 представлен в виде блока субмодели (рис. 3). Для упрощения представления модели реализованы замыкание на землю и неполнофазный режим работы только для одной фазы. Задание и отображение всех параметров элементов модели осуществляются с помощью удобного инструмента SimInTech – скрипта, под которым подразумевается программа на языке высокого уровня, которая позволяет осуществлять любые манипуляции с объектами модели.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 7 в качестве примера представлены кривые токов фазы А в случае нормального режима работы сети, короткого замыкания и обрыва одной из фаз сети, а на рисунке 8 – кривые токов в первичной обмотке трансформатора напряжения для этих же режимов, на которых видно, что как в результате короткого замыкания, так и обрыва одной из фаз в цепи первичной обмотки трансформатора напряжения наблюдаются феррорезонансные явления, которые приводят к большим значениям токов, способствующих отказу трансформатора.

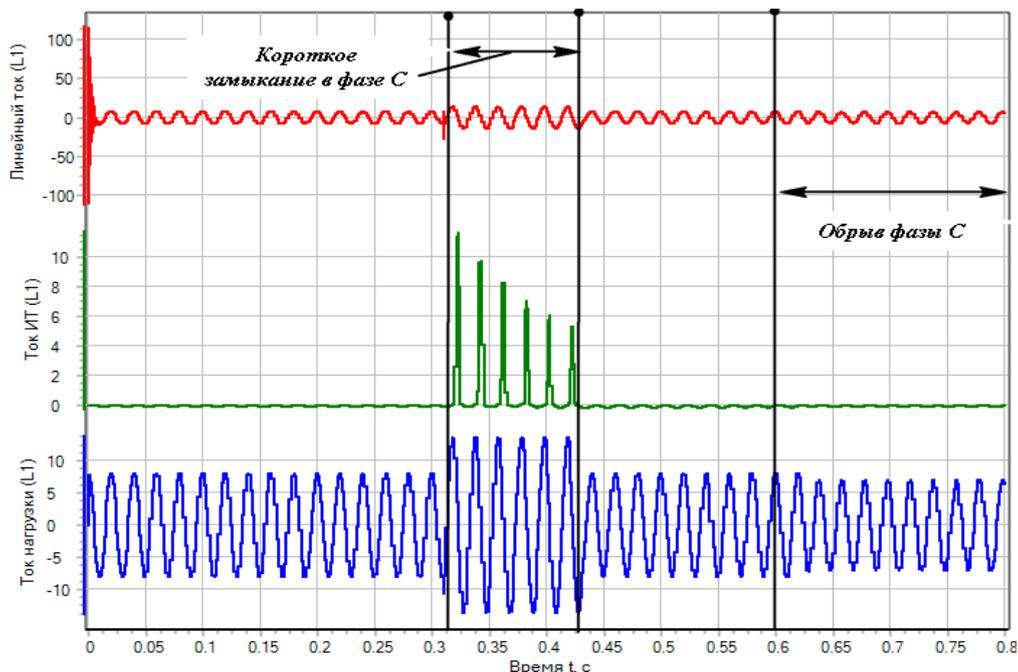


Рис. 7. Кривые линейного тока фазы А, тока в первичной обмотке фазы А трансформатора напряжения и тока нагрузки

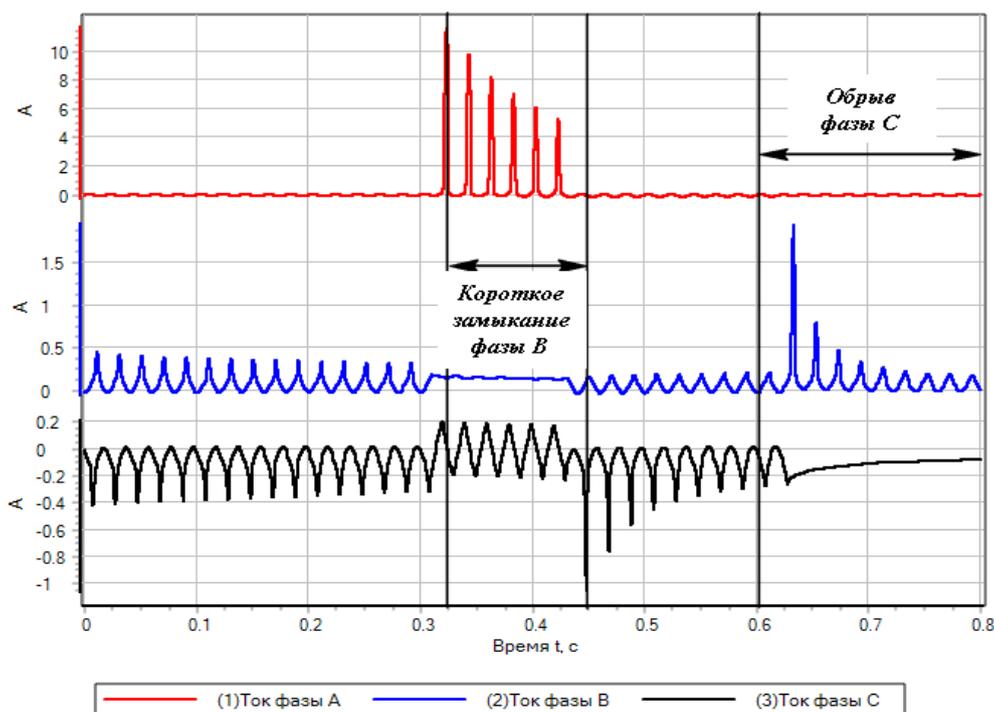


Рис. 8. Кривые токов в первичной обмотке трансформатора

Таким образом, предложенная методика моделирования позволяет проводить исследования переходных процессов в сетях напряжения 10 кВ, вызванных внешними воздействиями и при различных структурах сети. С помощью программного комплекса SimInTech, строя соответствующие модели, можно успешно решать задачи повышения надежности сельскохозяйственных электрических сетей путем рационального подбора их компонентов.

Выводы

1. Сельскохозяйственные распределительные сети напряжения 10 кВ представляют собой пример феррорезонансной цепи, так как включают индуктивности с нелинейной кривой насыщения (силовые трансформаторы, трансформаторы для измерения напряжения, шунтирующие реакторы и др.), а также емкостные элементы в виде длинных линий, конденсаторов повышения коэффициента мощности на трансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ, дугогасительных и фильтрующих элементов коммутационных аппаратов и др., а поэтому в данных сетях возможно возникновение феррорезонансных явлений, которые приводят к серьезным повреждениям оборудования.

2. Результаты моделирования нормального режима работы электрической сети 10 кВ, короткого замыкания и обрыва одной из фаз сети в среде SimInTech показали, что при коротком замыкании, а также в случае обрыва одной из фаз в цепи первичной обмотки трансформатора напряжения наблюдаются феррорезонансные явления, которые приводят к большим значениям токов и отказу трансформатора.

3. Предложенная методика моделирования режимов электрической сети 10 кВ позволяет проводить исследования переходных процессов в данных сетях, вызванных внешними воздействиями и при различных структурах сети. С помощью программного комплекса SimInTech, строя соответствующие модели, можно успешно решать задачи повышения надежности сельскохозяйственных электрических сетей путем рационального подбора их компонентов.

Список источников

1. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Картавец В.В. и др. Моделирование феррорезонанса в электрических цепях с помощью программы SimInTech // Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: материалы национальной научно-практической конференции (Воронеж, 25 сентября 2020 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. С. 408–412.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 320 с.
3. Гиндуллин Ф.А., Гольдштейн В.Г., Дульзон А.А. и др. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 190 с.
4. Гуль В.И., Нижевский В.И., Хоменко И.В. и др. Координация изоляции и перенапряжений в электрических высоковольтных сетях. Харьков: ЭДЭНА, 2009. 270 с.
5. Дударев Л.Е. Численный анализ феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью // Электрические станции. 1991. № 1. С. 31–35.
6. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. Новосибирск: НГТУ, 2004. 319 с.
7. Киреева Э.А. Феррорезонанс и ограничение его влияния на надежность и долговечность работы систем электроснабжения // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 9. С. 22–31.
8. Колечицкая Н.А., Лазарев Н.С., Шульга Р.Н. и др. Феррорезонансные явления на шинах подстанций 6–10 кВ // Электротехника. 2013. № 4. С. 2–8.
9. Пиляев С.Н., Картавец В.В., Афоничев Д.Н. Моделирование феррорезонанса в электрических сетях 10 кВ // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции (Воронеж, 08–09 июня 2021 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. Ч. 1. С. 102–110.
10. Ashok Kumar L., Indragandhi V., Uma Maheswari Y. Software Tools for the Simulation of Electrical Systems. Theory and Practice. United Kingdom, London: Academic Press, 2020. 416 p.

References

1. Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Kartavtsev V.V. et al. Modelirovanie ferrozonansa v elektricheskikh tsepyakh s pomoshch'yu programmy SimInTech. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v sel'skokhozyajstvennom proizvodstve: materialy natsional'noj nauchno-prakticheskoy konferentsii (Voronezh, 25 sentyabrya 2020 g.) [Simulation of ferroresonance in electrical circuits using the SimInTech program. Mechanization and automation of technological processes in agricultural production: Proceedings of the National Research-to-Practice Conference (Voronezh, September 25, 2020)]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University Press; 2020:408-412. (In Russ.).
2. Voldek A.I., Popov V.V. Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory [Electrical machinery. Introduction to Electrical Engineering. Direct-current machines and transformers]. Saint Petersburg: Piter Press, 2008. 320 p. (In Russ.).
3. Gindullin F.A., Goldshtein V.G., Dulzon A.A. et al. Perenapryazheniya v setyakh 6-35 kV [Overvoltage in 6-35 kV electric power networks]. Moscow: Energoatomizdat; 1989. 190 p. (In Russ.).
4. Gul V.I., Nizhevskiy V.I., Khomenko I.V. et al. Koordinatsiya izolyatsii i perenapryazhenij v elektricheskikh vysokovol'tnykh setyakh [Coordination of isolation and overvoltage in electrical high-voltage networks]. Kharkiv: EDENA; 2009. 270 p. (In Russ.).
5. Dudarev L.E. Chislennyj analiz ferrozonansnykh protsessov v setyakh s izolirovannoy nejtral'yu [Numerical analysis of ferroresonance processes in networks with isolated neutral]. *Elektricheskie stantsii = Electric Stations*. 1991;1:31-35. (In Russ.).
6. Kadomskaya K.P., Lavrov Yu.A., Reiherdt A.A. Perenapryazheniya v elektricheskikh setyakh razlichnogo naznacheniya i zashchita ot nikh [Overvoltage in electrical networks for various purposes and surge protection]. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Press; 2004. 319 p. (In Russ.).
7. Kireeva E.A. Ferrozonans i ogranichenie ego vliyaniya na nadezhnost' i dolgovechnost' raboty sistem elektrosnabzheniya [Ferroresonance and limitation of its influence on the reliability and durability of power supply systems]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont = Electrical Equipment: Operation and Repair*. 2012;9:22-32. (In Russ.).
8. Kolechitskaya N.A., Lazarev N.S., Shulga R.N. et al. Ferrozonansnye yavleniya na shinakh podstantsij 6-10 kV [Ferroresonance phenomena on 6-10 kV substation busbars]. *Elektrotekhnika = Electrical Engineering*. 2013;4:2-8. (In Russ.).
9. Pilyaev S.N., Kartavtsev V.V., Afonichev D.N. Modelirovanie ferrozonansa v elektricheskikh setyakh 10 kV. Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (Voronezh, 08-09 iyunya 2021 g.) [Simulation of ferroresonance in 10 kV electric power networks. Energy efficiency and energy saving in modern production and society: Proceedings of the International Research-to-Practice Conference (Voronezh, June 08-09, 2021)]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University Press. 2021;1:102-110. (In Russ.).
10. Ashok Kumar L., Indragandhi V., Uma Maheswari Y. Software Tools for the Simulation of Electrical Systems. Theory and Practice. United Kingdom, London: Academic Press; 2020. 416 p.

Информация об авторах

Д.Н. Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», dmafonichev@yandex.ru.

С.Н. Пиляев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», pilyaevs@mail.ru.

В.В. Картавцев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», vkartavtsev@mail.ru.

Information about the authors

D.N. Afonichev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, dmafonichev@yandex.ru.

S.N. Pilyaev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, pilyaevs@mail.ru.

V.V. Kartavtsev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, vkartavtsev@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 09.09.2023; одобрена после рецензирования 11.10.2023; принята к публикации 21.10.2023.

The article was submitted 09.09.2023; approved after reviewing 11.10.2023; accepted for publication 21.10.2023.

© Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Картавцев В.В., 2023