

УДК 621.311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА МЕЖДУФАЗНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ В ВОЗДУШНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА

Канд. техн. наук, доц. КАЛЕНТИОНОК Е. В., студ. ЯКОВЧИЦ Е. О.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: ekol5@tut.by

Большинство способов определения мест повреждений на основе односторонних измерений характеристик аварийного режима используют параметры установившегося режима короткого замыкания на основной частоте. Такой подход вынуждает дополнительно искать способы отстройки от нагрузок трансформаторных подстанций, кроме того, он подвержен влиянию нелинейности дуги в месте короткого замыкания, что значительно снижает точность дистанционного определения мест повреждений.

Для определения расстояния до места междуфазного повреждения в воздушных распределительных сетях предложен новый способ, использующий гармонические составляющие параметров аварийного режима. Алгоритм реализации данного способа включает: снятие осциллограмм значений параметров аварийного режима (например, при двухфазном повреждении – ток короткого замыкания, линейное напряжение между поврежденными фазами) с необходимым шагом дискретизации; разложение параметров аварийного режима в ряд Фурье (реализовано алгоритмом быстрого разложения Фурье); определение расстояния до места повреждения по аналитическому выражению; выполнение статистического анализа ряда значений расстояний и нахождение наиболее вероятного расстояния до места повреждения.

Для исследования эффективности предложенного способа улавливания гармонических составляющих рассмотрена распределительная электрическая сеть напряжением 10 кВ, питающая девять трансформаторных подстанций. Расчеты нормальных и аварийных режимов проводили с использованием программы MatLab в среде динамического моделирования Simulink. Дуга представлена блоком, который описывает линеаризованную динамическую вольт-амперную характеристику дуги. Построены зависимости значения расстояния до места повреждения от частоты, на которой данное значение было получено, и количества его повторений. На основе расчетов установлено, что точность определения расстояния до места междуфазного повреждения зависит от шага дискретизации осциллографа, длительности и запаздывания начала записи параметров аварийного режима.

Ключевые слова: электрическая сеть, определение места повреждения, аварийный режим, гармонические составляющие.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

DISTANCE ESTIMATION TO THE INTERPHASE-FAULT LOCATION IN THE DISTRIBUTIVE AIR-LINE GRIDS BASED ON ANALYSIS OF THE HARMONIC COMPONENT PARAMETERS OF THE OPERATING EMERGENCY CONDITIONS

KALENTIONOK Ye. V., YAKOVCHITS Ye. O.

Belarusian National Technical University.

Most techniques of the fault location based on the one-side measurement of the emergency mode characteristics use the short-circuit steady-regime parameters in the fundamental mode frequency. This approach compels to seek additional devices for tuning out the loadings of transformer-substations. Besides, it is susceptible to the nonlinearity effect of closed-circuit arc in the fault location which significantly reduces the accuracy of the remote location of the failure.

For estimating the distance to the location of interphase failure on the aerial distributive transmission lines the article proposes a new technique employing the harmonic components of the operating emergency parameters. The algorithm of the present method realization includes: taking down oscillograms of the emergency-mode parameter values (e. g. in double-phase failure – the short-circuit current, the linear voltage between the faulty phases) with necessary discretization interval; expansion of the operating emergency parameters in a Fourier series (realized with a quick Fourier expansion algorithm); estimating the distance to the fault location by the analytical expression; performing the statistical analysis of a row of distance values and finding the most probable distance to the fault location.

For effectiveness investigation of the proposed method of trapping harmonic components the paper considers a 10 kV distributive electrical grid feeding nine transformer substations. The authors performed calculation of normal and emergency modes utilizing computer program MatLab in dynamic simulating environment Simulink. The arc is represented by a block describing the linearized dynamic volt-ampere characteristic of the arc. The built characteristic curves demonstrate dependence of the fault-location distance value from the frequency at which this value is obtained and the number of its reiterations. Based on the calculations, the authors establish that the accuracy of the distance determination to the interphase fault location depends on the oscillograph-discretization interval, the duration and the record-start delay of the operating emergency parameters.

Keywords: electric grid, fault location finding, operating emergency conditions, harmonic components.

Fig. 4. Tab. 1. Ref.: 11 titles.

Междуфазные короткие замыкания в распределительных электрических сетях являются распространенным видом повреждения. Они встречаются более чем в 40 % случаев и могут быть вызваны повреждением оборудования трансформаторных подстанций, концевых кабельных разделок, разрушением изоляторов, перекрытиями изоляции во время грозы, падением деревьев на провода воздушной линии электропередачи и др. [1, 2].

Междуфазные короткие замыкания требуют мгновенного отключения линии, так как могут вызвать необратимые повреждения оборудования. Отключение линии может вызвать погашение потребителей (питающихся по одной или по двум линиям без использования АВР) или снизить надежность их электроснабжения (для питания с двух и более сторон, при условии установки АВР). Перерыв в работе электроприемников 2-й категории приводит к массовому недоотпуску продукции, простоям рабочих, механизмов, что ведет к экономическому ущербу [3, 4]. Перерыв в электроснабжении электроприемников 3-й категории должен быть ликвидирован за 24 ч, что ставит рамки времени его устранения. Время восстановления воздушной линии (ВЛ) складывается из времени определения зоны и места повреждения, времени движения ремонтной бригады к зоне повреждения и проведения собственно ремонтно-восстановительных работ. Как показывает опыт, большая часть времени на восстановление ВЛ

(до 2/3) расходуется на отыскание места повреждения (ОМП). Поэтому один из возможных путей уменьшения времени восстановления работы сети – снижение времени ОМП. Наибольшая быстрота характерна для методов, которые возможно автоматизировать, так как персонал в этом случае не тратит время на мероприятия по отысканию места повреждения. Один из таких – метод ОМП по параметрам аварийного режима.

Методы ОМП по параметрам аварийного режима можно классифицировать на методы одно- и двустороннего замеров. Для распределительных электрических сетей более актуальны способы одностороннего замера, где на первый план выходят простота реализации и малые затраты на приобретение и обслуживание устройств ОМП. Существует множество способов односторонних ОМП по характеристикам аварийного режима, однако многие из них используют параметры установившегося режима короткого замыкания (КЗ) на основной частоте. Такой подход вынуждает дополнительно искать способы отстройки от нагрузок трансформаторных подстанций, а также подвержен влиянию нелинейности дуги в месте КЗ.

В настоящее время осуществляется переход к производительным микропроцессорным устройствам релейной защиты и автоматики [5, 6], многие из которых имеют возможность взаимодействовать с электрической сетью с помощью ненасыщающихся трансформаторов тока (катушек Роговского, оптических трансформаторов тока), а также могут хранить осциллограммы предшествующих режимов. Это делает актуальным новый подход к ОМП по параметрам аварийного режима, использующий для расчетов не установившийся процесс КЗ, а всю осциллограмму аварийного режима (т. е. начало повреждения, установившийся процесс, затухание). Такой подход применен в предлагаемом способе ОМП на основе улавливания гармонических составляющих параметров аварийного режима. Рассмотрим алгоритм его реализации.

1. Снятие осциллограмм значений параметров аварийного режима (например, при двухфазном повреждении – ток КЗ, линейное напряжение между поврежденными фазами) с необходимым шагом дискретизации.

2. Разложение параметров аварийного режима в ряд Фурье (реализовано алгоритмом быстрого разложения Фурье [7]).

3. Определение расстояния до места повреждения по выражению [8, 9]

$$l_f = \frac{\operatorname{Im}\left(\frac{Uf_{ab}}{If_{ab}}\right)}{2\pi f L_1}, \quad (1)$$

где f – частота разложения Фурье; l_f – расстояние до места повреждения, найденное на частоте f ; Uf_{ab} – вектор напряжения ab на частоте f ; If_{ab} – вектор тока КЗ (ab) на частоте f ; L_1 – удельная индуктивность линии.

4. Статистический анализ ряда l_f и нахождение наиболее вероятного расстояния до места повреждения.

Для исследования эффективности предложенного способа улавливания гармонических составляющих рассмотрена принципиальная распределительная электрическая сеть напряжением 10 кВ, представленная на рис. 1.

Исследования проводили для режима двухфазного КЗ. Расчетным местом возникновения КЗ принимали точку К (рис. 1), которая является самой удаленной, и поэтому ОМП при повреждении в этой точке наиболее подвержено влиянию нагрузки. Расчеты нормальных и аварийных режимов проводили с использованием программы MatLab в среде динамического моделирования Simulink [10, 11]. Расчетная схема распределительной электрической сети приведена на рис. 2.

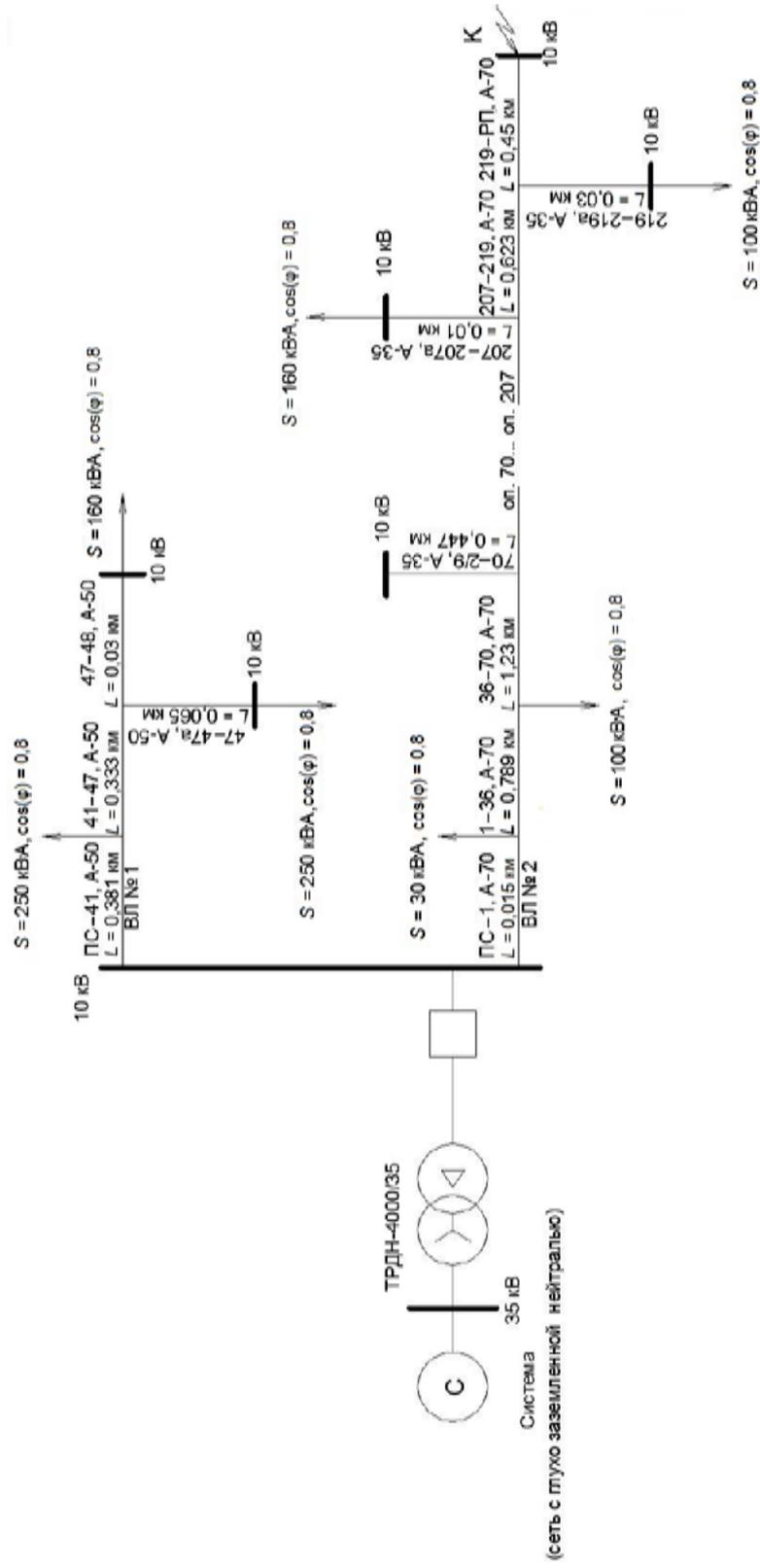


Рис. 1. Принципиальная схема распределительной электрической сети напряжением 10 кВ

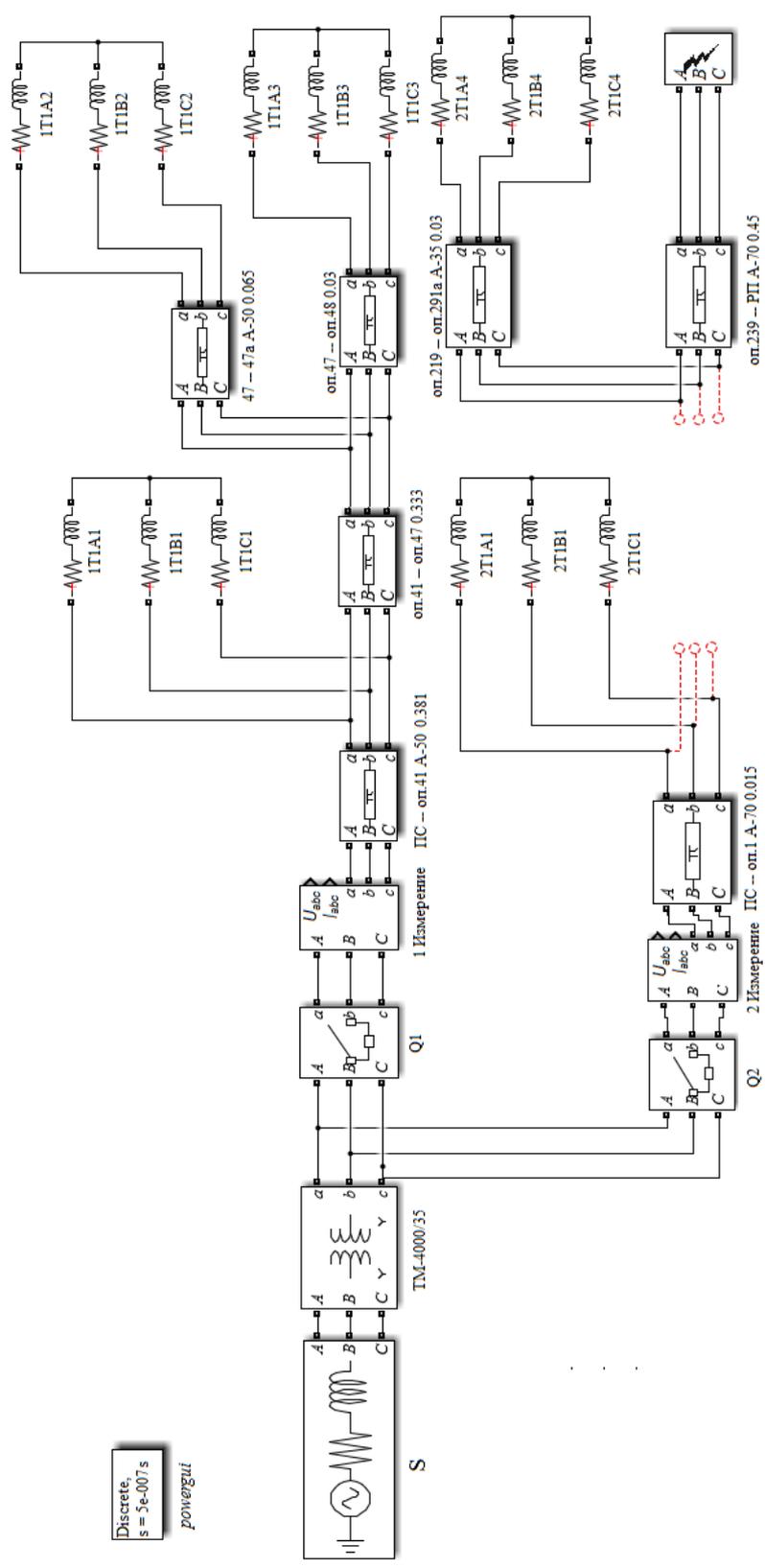


Рис. 2. Расчетная схема распределительной электрической сети напряжением 10 кВ

Дуга представлена блоком, который описывает ее линейризованную динамическую вольт-амперную характеристику (рис. 3), построенную по трем точкам: $u_1 = 3000$ В, $i_1 = 300$ А; $u_2 = 2000$ В, $i_2 = 400$ А; $u_3 = 2500$ В, $i_3 = 1000$ А.

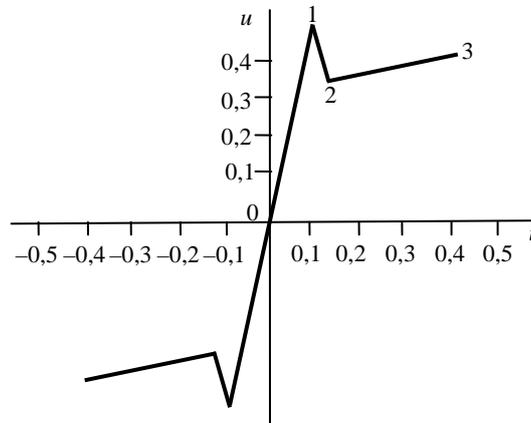


Рис. 3. Линейризованная динамическая вольт-амперная характеристика дуги

В ходе эксперимента фиксировали ток замыкания и линейное напряжение между поврежденными фазами. При выполнении исследований рассмотрены следующие наборы условий:

- 1-й: шаг дискретизации осциллографа 0,05 мкс; длительность записи 0,25 с (включая 0,2 с – время аварийного режима; 0,05 с – время затухания аварийного режима); запаздывание старта записи параметров режима 0; дуга присутствует;
- 2-й: шаг дискретизации осциллографа 0,5 мкс; длительность записи 0,25 с (включая 0,2 с – время аварийного режима; 0,05 с – время затухания аварийного режима); запаздывание старта записи параметров режима 0; дуга присутствует;
- 3-й: шаг дискретизации осциллографа 0,5 мкс; длительность записи 0,25 с (включая 0,2 с – время аварийного режима; 0,05 с – время затухания аварийного режима); запаздывание старта записи параметров режима 50 мкс; дуга присутствует;
- 4-й: шаг дискретизации осциллографа 0,5 мкс; длительность записи 0,25 с (включая 0,2 с – время аварийного режима; 0,05 с – время затухания аварийного режима); запаздывание старта записи параметров режима 0; дуга отсутствует;
- 5-й: шаг дискретизации осциллографа 0,5 мкс; длительность записи 0,07 с (включая 0,05 с – время аварийного режима, 0,02 с – время затухания аварийного режима); запаздывание старта записи параметров режима 50 мкс; дуга присутствует.

На основе результатов расчета получены зависимости значения расстояния до места повреждения (L , км) от частоты, на которой данное значение было получено (f , Гц), и зависимости количества повторений n данного значения от величины значения L , приведенные на рис. 4.

Как видно из рис. 4, наиболее выраженный пик (зависимость $n(L)$) наблюдается в диапазоне частот 4–600 Гц. После статистической обработки данных этого диапазона (нахождение среднего значения в пике) получены результаты, приведенные в табл. 1.

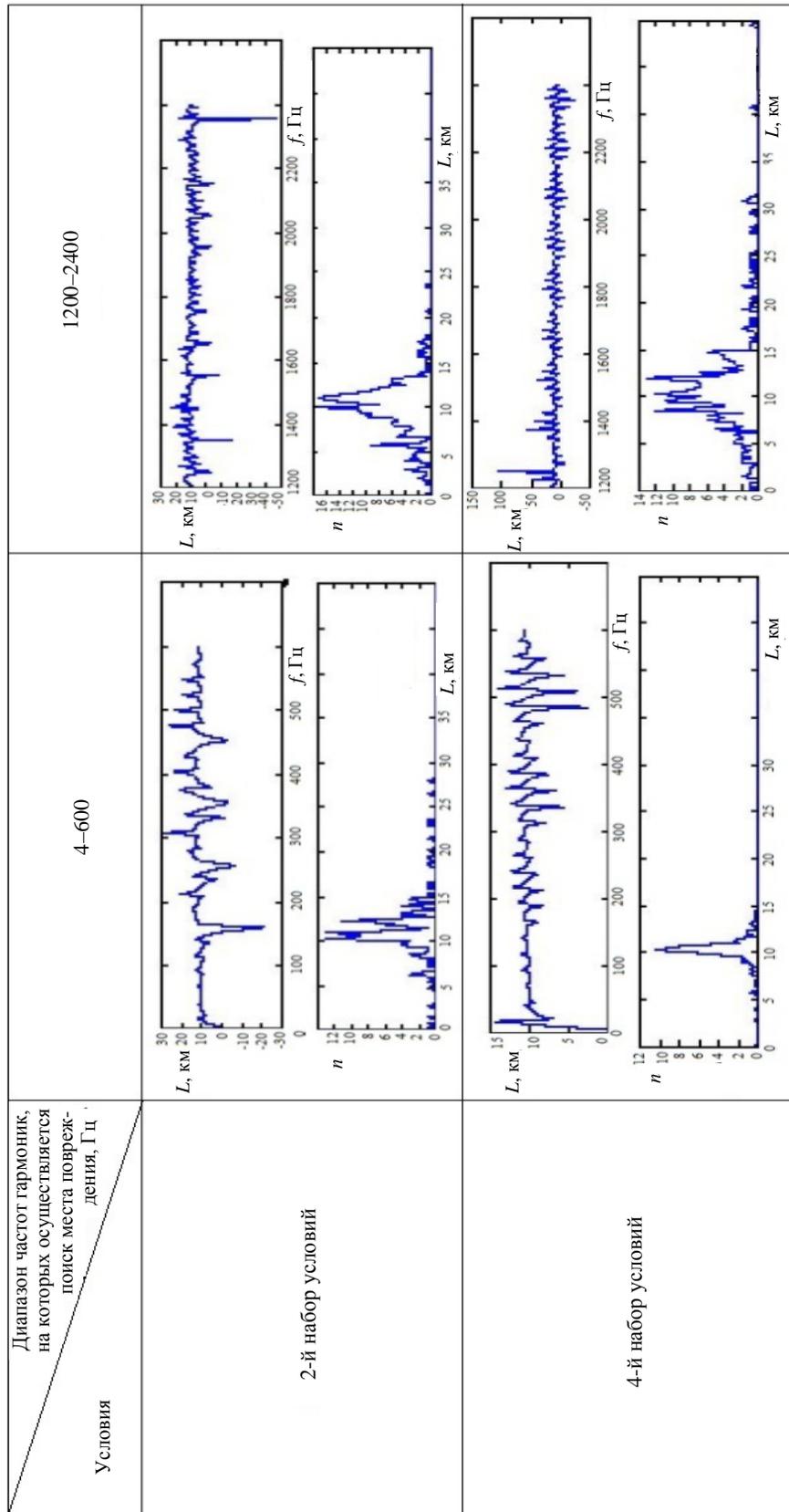


Рис. 4. Результаты исследования способа улавливания гармонических составляющих

Таблица 1

Набор условий	1	2	3	4	5
Расстояние до места повреждения, км	10,625	10,25	10,75	10,25	9,75
Погрешность, %	0,320	3,80	0,80	3,80	8,70

Анализ результатов измерений показывает, что наибольшая погрешность (8,7 %) имеет место в 5-м наборе условий. Это обусловлено небольшой длительностью записи аварийного режима (0,07 с) и запаздыванием старта записи параметров режима на 50 мкс. Наиболее точные результаты определения расстояния до места повреждения наблюдаются при небольшом шаге дискретизации осциллографа, равном 0,05 мкс (1-й набор условий), и отсутствии дуги в месте КЗ (3-й набор условий).

ВЫВОДЫ

1. Для определения расстояния до места междуфазного повреждения в воздушных распределительных сетях предложен новый способ, использующий гармонические составляющие параметров аварийного режима, который может быть программно реализован в современных микропроцессорных терминалах релейной защиты и автоматики.

2. Точность определения расстояния до места междуфазного повреждения зависит от шага дискретизации осциллографа, длительности и запаздывания начала записи параметров аварийного режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калентионок, Е. В. Статистический анализ повреждаемости воздушных распределительных электрических сетей / Е. В. Калентионок // Энергия и менеджмент. – 2011. – № 4. – С. 15–17.
2. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г. М. Шалыт. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
3. Нормы проектирования электрических сетей внешнего электроснабжения напряжением 0,4–10 кВ сельскохозяйственного назначения: ТКП 385–2011. – Минск: Минэнерго, 2011. – 55 с.
4. Китушин, В. Г. Надежность энергетических систем / В. Г. Китушин. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 256 с.
5. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
6. Шабад, М. А. Автоматизация распределительных электрических сетей с использованием цифровых реле / М. А. Шабад. – М.: Энергетик, 2003. – 68 с.
7. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: в 3 т. / Г. М. Фихтенгольц. – М.: Физматлит, 2003. – Т. 3. – 728 с.
8. Аржанников, Е. А. Методы и приборы определения места короткого замыкания на линиях / Е. А. Аржанников, А. М. Чухин. – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, 1998. – 74 с.
9. Айзенфельд, А. И. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями / А. И. Айзенфельд, Г. М. Шалыт. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
10. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystem и Simulink / И. В. Черных. – СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
11. Дьяконов, В. MatLab: справ. / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.

REFERENCES

1. Kalentionok, Ye. V. (2011) Statistical Analysis of Damageability of the Distributive Air-Line Grids. *Energija i Menedzhment* [Energy and Management], 4, 15–17 (in Russian).

2. Shalyt, G. M. (1982) *Fault-Location Finding in the Electric Grids*. Moscow, Energoatomizdat. 312 p. (in Russian).
3. ТКР 385–2011. Design Standards for the Electric Grids of the Outside Power Supply of 0,4–10 kV for Agricultural Purposes. Minsk, Minenergo, 2011. 55 p. (in Russian).
4. Kitushin, V. G. (2003) *Reliability of the Energy Systems*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University [NSTU]. 256 p. (in Russian).
5. Shnereson, E. M. (2007) *Digital Protective Relaying*. Moscow, Energoatomizdat. 549 p. (in Russian).
6. Shiba, M. A. (2003) *Automation of the Distributive Electrical Grids with Digital Relays Employing*. Moscow, Energetik. 68 p. (in Russian).
7. Fikhtengol'ts, G. M. (2003) *The Course of Differential and Integral Calculus. Vol. 3*. Moscow, Fizmatlit. 728 p. (in Russian).
8. Arzhannikov, Ye. A., & Chukhin, A. M. (1998) *Techniques and Instruments for Closed-Circuit Fault Location Finding in the Lines*. Ivanovo: Ivanovo State Electric-Power University. 74 p. (in Russian).
9. Aizenfeld, A. I., & Shalyt, G. M. (1988) *Short-Circuit Fault Finding in the Lines with Subbranches*. Moscow, Energoatomizdat. 160 p. (in Russian).
10. Chernykh, I. V. (2008) *Modeling Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystem and Simulink*. Saint Petersburg, Piter. 288 p. (in Russian).
11. Diyakonov, V., & Kruglov, V. (2002) *MatLab. Reference Book*. Saint Petersburg, Piter. 448 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 14.04.2015

УДК 621.313

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА МАГНИТНОЙ ЦЕПИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИНКОРПОРИРОВАННЫМИ МАГНИТАМИ

Асп. НГО ФЫОНГ ЛЕ, канд. техн. наук, доц. ГУЛЬКОВ Г. И.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: nqo.phuonq.le@gmail.com

Одним из важнейших этапов проектирования синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами является расчет магнитной системы, который упрощенно можно осуществить с помощью метода эквивалентных схем магнитных цепей. Рассмотрена магнитная цепь синхронного двигателя с инкорпорированными в роторе магнитами, имеющая четыре участка: постоянные магниты с полюсом из магнитомягкой стали; участки рассеяния магнитного потока, включающие воздушные барьеры и стальные мосты; воздушный зазор; пазы, зубцы и ярмо статора. Получена эквивалентная схема магнитной цепи. В качестве постоянных магнитов использованы высокоэнергетические магниты, у которых кривая размагничивания описывается линейным уравнением. Магнитный поток на полюс создается двумя магнитами. Падением магнитного потенциала в стали полюса пренебрегали вследствие допущения о том, что магнитная проницаемость полюсов $\mu = \infty$. В конструкции ротора предусматриваются воздушные барьеры и стальные мосты, через которые замыкается магнитный поток рассеяния. Для учета насыщения стальных мостов выполнена линеаризация кривой намагничивания, которая представлена ломаной линией, состоящей из двух прямолинейных участков. Расчет участка магнитной цепи, включающего зубцы и ярмо статора, осуществляли с учетом