

2) the first harmonic of the output AF voltage determines the value of the hybrid compensator's RP.

According to [5] in 0.4 kV networks normally permissible value of harmonic distortion is 8%, the maximum allowable value - 12%. Selecting the maximum output AF voltage of the active filter at 10% of network voltage, it is possible to regulate the value of hybrid compensator's reactive power in the range $(0,9 \div 1,1) \cdot Q_{\text{rated}}$.

It's economically advisable for hybrid VAR compensator to decrease the output AF voltage, which allows to use a more effective low-voltage power components.

Conclusions

1. Hybrid VAR compensator, which is consisting of series-connected TSC and AF, is proposed. It allows to "isolate" TSC from harmonic currents and to provide smooth control of the RP.

2. Proposed is an improved hybrid VAR compensator, which allows to use standard capacitor banks delta-connected. It simplifies the practical implementation of the device, provides smooth control of the RP and protection of the CB from harmonic currents.

Bibliography:

1. Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review / J.W. Dixon, L. Moran, J. Rodríguez, R. Domke // Proceedings of the IEEE. – 2005 – Vol. 93, Dec. – №12. – Pp. 2144-2164.
2. A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter / J.W. Dixon, Y. del Valle, M. Orchard, M. Ortúzar, L. Morán, C. Maffrand // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2003. – Vol. 50, Oct. – №5. – Pp. 982-989.
3. Pat. 6876179 USA, Int. Cl. G 05 F 1/70, H 02 M 1/12. Hybrid Reactive Power Compensation Device.
4. Pat. 106174 Ukraine, Int. Cl. G 05 F 1/70, H 02 J 3/18. Method of the reactive power compensation / V. Burlaka, S. Gulakov, S. Podnebenna; State higher educational establishment «Priazovskyi state technical university». – №a201310826; filed 09.09.13; published 10.09.14, Bull. №17. – 5 p. (Ukr.)
5. IEEE Standard 1459-2010. Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. – Approved 2010-2-2. – IEEE-SA Standards Board, 2010. – 72 p.

Reviewer: I.V. Zhezhelenko

dr. tech. of science, professor «Priazovskyi state technical university»

Received 30.10.2014

УДК 621.316.925

© Дьяченко М.Д.¹, Тесля Ю.А.²

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И РАННЕГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В статье рассмотрены основные предпосылки необходимости создания автоматизированной системы мониторинга и раннего диагностирования состояния высоковольтных контактных соединений, приведены основные аппаратные и алгоритмические решения.

Ключевые слова: контактные соединения, системы мониторинга, системы диагностирования, сенсорные сети, самоорганизующаяся сеть.

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, dmd17@rambler.ru

² инженер, ООО «ВДТ-Автоматизация», г. Мариуполь, teslyaua@gmail.com

Д'яченко М.Д., Тесля Ю.А. Передумови створення автоматизованої системи моніторингу та раннього діагностування стану високовольтних ліній електропередач. У статті розглянуті основні передумови необхідності створення автоматизованої системи моніторингу та раннього діагностування стану високовольтних контактних з'єднань, наведені основні апаратні і алгоритмічні рішення.

Ключові слова: контактні з'єднання, системи моніторингу, системи діагностування, сенсорні мережі, самоорганізована мережа.

M.D. Dyachenko, Yu.A. Teslya. Prerequisites of the automated system of monitoring and early diagnosis of the state of high-voltage lines. Violation of the contact connection leads either to breakage of the conductor, or fire equipment. Currently, for technical inspection of high voltage contact connections used method of thermal control or periodic visual inspection. Such control of long power lines becomes expensive. Therefore, to improve the reliability of connections required automatic condition monitoring of high-voltage contact connections. The system consists of a set of intelligent modules, located directly to contact connection and continuously measure its temperature and contact resistance. Microprocessor control module has a continuous connection with the same modules on other low-power contact connections via packet radio transceiver. The basis of the organization of an information network on the concept of self-organizing sensor networks. In it, each intelligent module performs the function of a router. It solves the problem of finding an optimal route data to central control. He can change the decision if conditions change operation transceiver equipment. This solution allows using a low-power transmitter to provide coverage in the long power lines more than hundreds km. And provide excellent data transmission quality. The proposed system allows continuous monitoring of each high-voltage power system contact connection, predict rejection of degradation of each of them and thus improve the reliability of power supply in general.

Keywords: contact joints, system monitoring, diagnostics, sensor networks, self-organizing network.

Постановка проблеми. Высоковольтная линия электропередач - это основной элемент системы передачи электроэнергии. Контактные соединения токоведущих частей линий электропередачи одно из наиболее слабых мест такой сети. Своевременное выявление деградационных изменений в структуре контактного соединения позволит резко повысить надежность работы линии электропередачи в частности и энергосистемы в целом.

Анализ последних исследований и публикаций. Тема мониторинга и диагностирования высоковольтных линий электропередач, и состояния высоковольтных контактных соединений в целом является достаточно актуальной, что подтверждается большим количеством публикаций этого направления: Борисов Б.Д., Гаркуша В.В., Киншт Н.В., Шестун А.Н., Власов А.Б. и др. Существует несколько методов контроля контактных соединений линий электропередач. Например, таких как тепловизионный контроль, легкоплавких меток, термоиндикаторных красок и др. Однако мало кто рассматривает решение данной проблемы в комплексе путем создания централизованной автоматизированной системы контроля контактных соединений линий электропередачи.

Цель статьи. Целью статьи является обоснование необходимости разработки автоматизированной системы автоматического мониторинга и диагностирования состояния высоковольтных линий электропередач, работающей в режиме близком к режиму реального времени.

Изложение основного материала. Согласно статистике наиболее распространенной причиной возникновения аварийных ситуаций в высоковольтных распределительных сетях можно считать нарушение высоковольтных контактных соединений. Нарушение контактного соединения (КС) приводит либо к обрыву проводника, либо к обрыву и захлесту на опору либо на фазный проводник, что неизбежно вызывает короткое замыкание.

Появление оксида алюминия на контактирующих токоведущих поверхностях в процессе эксплуатации ведет к резкому увеличению переходного сопротивления соединителя и повышенному тепловыделению. В процессе монтажа данный дефект, как правило, не проявляется, а

становиться очевиден уже после аварии.

Процесс развития дефекта в контактном соединении протекает достаточно длительное время и зависит от ряда факторов, таких как ток нагрузки и его характер, воздействия химических реагентов окружающей среды, ветровых нагрузок, усилий затяжки болтов и других. Постепенное повышение переходного сопротивления КС происходит до определенного момента времени, после чего деградационные изменения переходят в лавинообразный отказ с интенсивным тепловыделением и, впоследствии, полным повреждением соединения.

В настоящее время для контроля технического состояния высоковольтных контактных соединений применяют метод периодического тепловизионного контроля [1] либо визуального контроля отпадающих цветных плавящихся указателей и термоиндикаторных красок. Такой контроль на территории подстанции не вызывает больших затруднений, но на большей протяженности линий электропередач становится весьма затратным. К тому же его нельзя назвать оптимальным, так как нагрев болтовых соединений зависит в основном от тока нагрузки, а при периодическом контроле нельзя быть уверенным, что в момент контроля ток через контролируемый элемент максимален. Особенно это актуально для крупных металлургических предприятий, имеющих в своем составе электрооборудование с резкопеременным режимом работы, таких как прокатные станы и дуговые сталеплавильные печи. Следовательно, для повышения надежности контактных соединений в частности и энергосистемы в целом необходима система непрерывного мониторинга их состояния. Причем контроль должен производиться не только по изменению температуры, но и по изменению переходного сопротивления контактных поверхностей.

Для решения поставленных задач разработан прототип автоматизированной системы автоматического мониторинга состояния контактных соединений. Система позволяет контролировать разницу скоростей изменения температуры проводника и контактного соединения, а также непосредственно контролировать изменение переходного сопротивления контактного соединения.

В основу системы положена технология WSN - беспроводные сенсорные сети (Wireless Sensor Network). Технология WSN представляет собой совокупность множества миниатюрных вычислительно - коммуникационных устройств – мотов (от англ. motes - пылинки). Каждый мот снабжен сенсорами (в нашем случае датчиками температуры и датчиками переходного сопротивления), а так же трансиверами, работающими в безлицензионном диапазоне радиочастот. Питание же самих сенсоров осуществляется за счет отбора энергии непосредственно от токоведущего проводника [2].

Сенсорные сети имеют значительные преимущества перед традиционным радиочастотным доступом к единичному датчику. Так как в сетевых протоколах «мотов» реализована технология самоорганизации распределенной радиосети то информация от сенсора передается не на центральный пункт сбора информации, а близлежащим сенсорам («мотам»), каждый из которых в соответствии с протоколом маршрутизации доставляет информацию адресату. Это позволяет на несколько порядков сократить мощность передатчика необходимую для покрытия значительных расстояний. Маломощный трансивер «мота» работает в безлицензионном диапазоне частот и при чрезвычайно малой мощности излучения в совокупности с другими «мотами», благодаря автоматической самоорганизации сети, создаются условия для покрытия огромных расстояний, даже если множество мотов по неизвестным причинам выйдет из строя.

По ходу перемещения информации между «мотами» вместо передачи исходных данных может производиться и предварительная обработка информации, в результате чего передаются далее только необходимые и частично обработанные данные.

Структура каждого вычислительно - коммуникационного устройства («мота»), установленного на контактном соединении, представлена на рис. 1. Благодаря развитию современной электроники данное устройство может быть изготовлено в минимальных габаритах и с малым потреблением. Оптимально же его изготовление по интегральной технологии. Непосредственное измерение переходного сопротивления контактного соединения дает более достоверный результат о его состоянии, чем контроль его температуры.

Такой контроль позволяет получить истинные данные вне зависимости от нагрузки линии электропередачи. Измерение переходного сопротивления контактного соединения основано на методе наложения контрольного тока (рис. 2). Для снижения требований к мощности ис-

точника питания контроль переходного сопротивления выполняется через значительные промежутки времени. Накопительный конденсатор через резистор большего сопротивления R2 медленно заряжается от источника питания VT1 (источник питания условно показан в виде гальванической батареи).

Накопительный конденсатор C1, заряженный до напряжения источника питания, разряжается через контролируемое переходное сопротивление контактного соединения КС и источник стабильного тока выполненного на транзисторе VT1 резисторе R1 и элементов микроконтроллера МК. При этом микроконтроллер МК измеряет падение напряжения на переходном сопротивлении контактного соединения и делает вывод о величине переходного сопротивления [3].

Как и в обычной сенсорной сети, программный компонент сети агрегирует каналный, сетевой уровень и уровень приложений, позволяющие поддерживать передачу данных от всех узлов сети к некоторым узлам «стокам» (базовым станциям), которые соединены со специализированной SCADA-системой отображающим состояние контактных соединений в режиме реального времени.

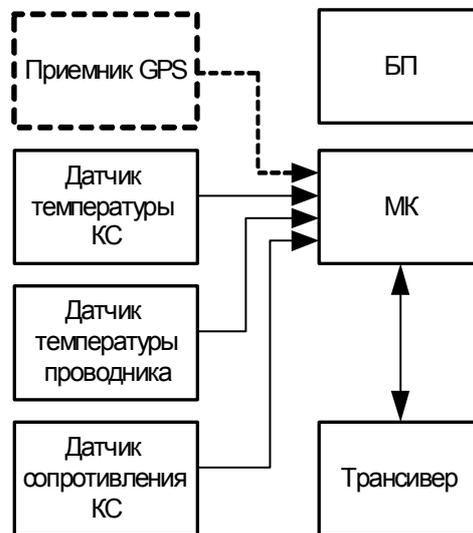


Рис. 1 – Структура вычислительно - коммуникационного устройства

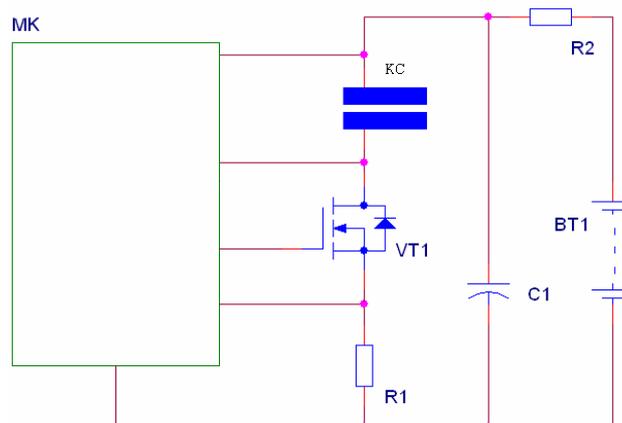


Рис. 2 – Упрощенная схема измерения сопротивления контактного соединения

Сенсорная сеть представляет собой самоорганизующуюся структуру [4] и в случае выхода из строя любого из узлов или добавления новых, поток данных от других узлов к базовой станции перераспределяется с учётом изменения конфигурации сети. Иными словами реализуется принцип спонтанной динамической маршрутизации (рис. 3) [5].

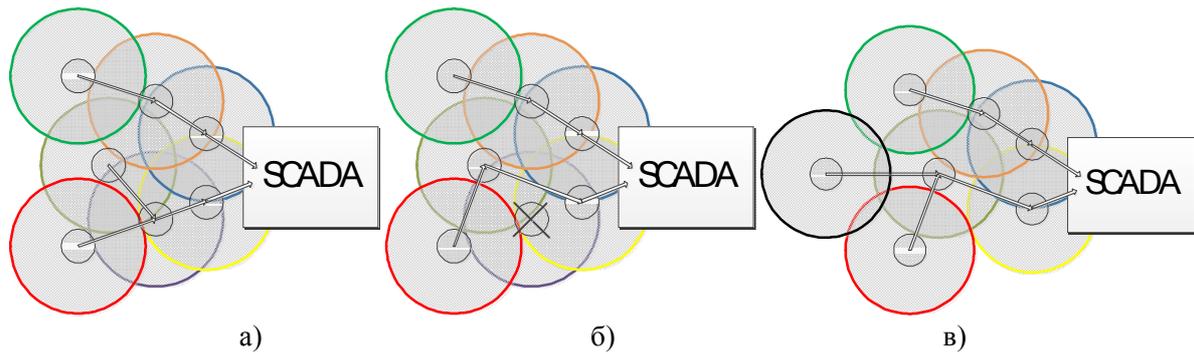


Рис. 3 – Изменение маршрута передачи данных при изменении конфигурации сети:
 а) – сенсорная сеть; б) – удаление узла из сети; в) – добавление узла в сеть

Динамическая маршрутизация строится на распределенной основе, когда в узлах сети анализируется адрес назначения каждого принимаемого пакета и определяется соответствующая исходящая линия связи. Исходящая линия выбирается путем обработки информации, локально хранимой в памяти с целью определения пути, обеспечивающего минимальную задержку доставки к адресату. Критерий маршрутизации постоянно обновляется с учетом, как работоспособности сети, так и длины очередей на соседних узлах. В результате отдельные пакеты одного сообщения могут следовать по сети по различным маршрутам к адресату. Данный тип маршрутизации в наибольшей степени пригоден для использования в условиях, когда необходимо обеспечить живучесть сети при наличии многократных повреждений узлов.

В связи с некоторыми особенностями данного применения сенсорной сети, возникает ряд трудностей по ее организации при использовании традиционных протоколов. Вызвано это тем, что в пределах подстанции число «мотов» во много раз превышает число «мотов» установленных на линии электропередачи, в результате неоправданно возрастает нагрузка сети за счет возникновения множества коллизий, тогда как в пределах линии электропередачи такой проблемы практически не существует. Для решения поставленной задачи выбран протокол OSPF, алгоритма Дейкстры.

Сущность алгоритма Дейкстры заключается в следующем. Пошагово сканируется каждая вершина (узел сети, в нашем случае «мот»), работа алгоритма завершается, когда все вершины посещены. В нем используется три массива из N чисел, которые соответствуют числу вершин [6]. Первый массив A содержит метки с двумя значениями: 0 (вершина еще не рассмотрена) и 1 (вершина уже рассмотрена); второй массив B содержит расстояния - текущие кратчайшие расстояния от и до соответствующей вершины; третий массив с содержит номера вершин - k -й элемент $C[k]$ есть номер предпоследней вершины на текущем кратчайшем пути из V_i в V_k . Матрица расстояний $D[i,k]$ задает длины дуге $D[i,k]$; если такой дуги нет, то $D[i,k]$ присваивается большое число E , равное "машинной бесконечности".

Тогда:

1. *Инициализация.* Производится поиск кратчайших путей из первой вершины в оставшиеся $(N-1)$;
 - от узла 1 до узла N массив A заполнить нулями;
 - заполнить числом i массив C ;
 - перенести i -ю строку матрицы D в массив B , $A[i] = 1$; $C[i] = 0$ (i - номер стартовой вершины)
2. *Шаг.* Находим минимальное расстояние среди неотмеченных вершин (т.е. тех k , для которых $A[k] = 0$). Текущее минимальное расстояние считается окончательным и пересмотру не подлежит (доказательство Э. Дейкстры).
 Пусть минимум достигается на индексе j , т.е. $B[j] \leq B[k]$. Затем выполняются следующие операции: $A[j] = 1$; если $B[k] > B[j] + D[j,k]$, то $B[k] = B[j] + D[j,k]$; $C[k] = j$ (Условие означает, что путь $V_i \dots V_k$ длиннее, чем путь $V_i \dots V_j V_k$). (Если все $A[k]$ отмечены, то длина пути от V_i до V_k равна $B[k]$. Необходимо перечислить вершины, входящие в кратчайший путь.

3. *Результат.* (Путь от V_i до V_k выдается в обратном порядке следующей процедурой:)
- 3.1 $z := C[k];$
 - 3.2 Выдать $z;$
 - 3.3 $z := C[z].$ Если $z = O,$ то конец, иначе перейти к 3.2.

Пусть имеется ориентированный граф $Q,$ который можно представить в виде матрицы:

	1	2	3	4	5
1		10	30	50	10
2					
3					10
4		40	20		
5	10		10	30	

Если в качестве источника взять вершину 1, то необходимо пошагово перебрать кратчайшие маршруты из вершины 1 в вершины 2, 3, 4 и 5. Фрагмент программного кода обработки матрицы может иметь вид:

```
while (!B(&B[0])) //Пока B не пусто.
{
    Min = Q;
    for (i=0;i<MaxNodes;i++)
        if (B[i]==1 && D[i]<Min) { Min = D[i]; u = i; }
    Q[u] = 0;
    for (i=0;i<MaxNodes;i++)
        if (B[i] == 1)
            if ( D[i] > D[u]+A[u][i] ) D[i] = D[u] + A[u][i];
}
```

Для выполнения данного алгоритма необходимо N раз просмотреть массив B из N элементов, так как алгоритм Дейкстры имеет квадратичную сложность: $O(n^2)$. Алгоритм заканчивает работу тогда, когда больше не может быть обработана ни одна из вершин. В начале алгоритма расстояние для начальной вершины полагается равным нулю, а все остальные расстояния заполняются большим положительным числом (большим максимального возможного пути в графе), а массив флагов заполняется нулями.

На каждом шаге цикла производится поиск вершины с минимальным расстоянием и флагом равным нулю, как только вершина найдена флаг в ней устанавливается в 1 и производится проверка всех соседних с ней вершин. Если расстояние в смежной вершине больше, чем сумма расстояния до текущей вершины то уменьшаем его. Цикл завершается, когда флаги всех вершин становятся равны единице. В общем случае реализация сети схематично показана на рисунке 4 (зеленый цвет – передача информационного пакета, черный – возможный путь передачи информационного пакета).

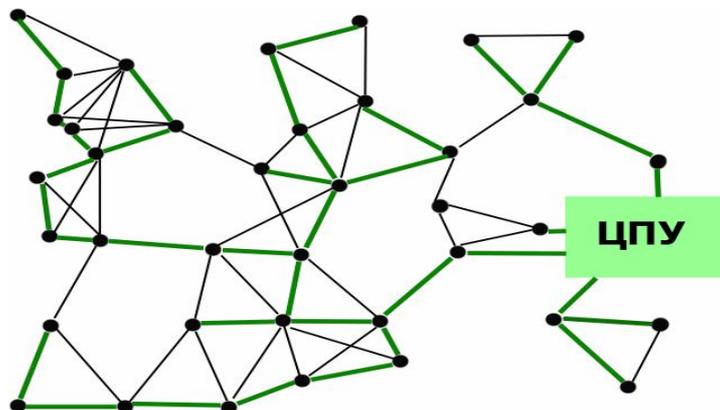


Рис. 4 – Схематичный пример реализации маршрутизации в сети

Как было уже отмечено, в пределах подстанции число мотов во много раз превышает число мотов установленных на линии электропередачи, то неоправданно возрастает нагрузка сети за счет возникновения множества коллизий. В связи с этим алгоритм автоматического конфигурирования сети несколько оптимизирован для решения данной задачи.

Каждый узел сети самостоятельно решает задачу оптимизации маршрута. В процессе выбора оптимального маршрута анализируется ориентированный граф сети. Чтобы понять, в каком состоянии находится линия связи, подключенные к его портам, маршрутизатор периодически обменивается короткими тестовыми пакетами со своими ближайшими соседями. Метрики выбранного пути могут характеризоваться следующими параметрами качества связи: - пропускной способностью канала; - уровнем напряженности поля полезного сигнала от тестирующего узла сети; - числом дейтограмм, стоящих в очереди для передачи; - загрузкой канала; - требованиями безопасности; - типом трафика; - числом шагов до цели. Узлам сети, находящимся вблизи узлов «стока», т.е. базовым станциям, а это узлы в пределах подстанций маршрут корректируется с учетом приоритетов по инициативе базовых станций. Учитывая то, что объем информации передаваемым каждым узлом сети весьма мал, можно полностью отказаться от сжатия передаваемой информации. Однако при увеличении количества «мотов» (узлов сети) объем передаваемой информации может резко возрасти. В этом случае уже целесообразно использовать технологию сжатия информации. Например, применить метод биномиального нумерационного сжатия [2]. Метод биномиального сжатия информации в сенсорных сетях довольно прост в реализации, не требует высоких аппаратных затрат и весьма эффективен при сжатии распределенной между элементами сети информации с неизвестной статистикой появления сообщений.

Выводы

В процессе исследований создан лабораторный и макетные образцы устройства мониторинга контактных соединений, которые в настоящее время проходят полевые испытания на контактных соединениях воздушной линии напряжением 330кВ. Можно считать, что данное решение является перспективным направлением в плане повышения надежности энергосистем и позволяет перейти на новый уровень качества их обслуживания. Применение интегральных технологий при реализации данных устройств позволит многократно сократить затраты для создания комплексных систем мониторинга контактных соединений высоковольтных сетей. Интегральная технология изготовления «мота» позволит довести его стоимость до стоимости крепежного компонента самого контактного соединения, т.е. болта либо гайки.

Список использованных источников:

1. Цирель Я.А. Применение приемников инфракрасного излучения для проверки контактов и изоляторов / В.С. Поляков, Я.А. Цирель // Электрические станции. – 1976. – №1. – С. 51-53.
2. Пат. 104546 Україна, МПК Н 02 Н 5/04. Пристрій автоматичного моніторингу стану контактних з'єднань високовольтних підстанцій і ліній електропередач / М.Д. Дьяченко, Ю.А. Тесля; ДВНЗ «Приазовський технічний університет». – №а201301914; заявл. 10.02.14; опубл. 10.02.14, Бюл. №3. – 4 с.
3. Дьяченко М.Д. Система автоматического дистанционного мониторинга состояния контактных соединений высоковольтного оборудования электрических сетей / М.Д. Дьяченко, Ю.А. Тесля // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ - Энергетика. – Минск, 2013. – №6. – С. 19-24.
4. Рагозин Д.В. Моделирование синхронизированных сенсорных сетей / Д.В. Рагозин // Проблеми програмування. – 2008. – №2-3. – С. 721-729.
5. Holger K. Protocols and Architecture for Wireless Sensor Networks / K. Holger, A. Willig. – Chichester : John Wiley & Sons, 2005. – P. 60-62.
6. Информационный ресурс: <http://algotlist.manual.ru/maths/graphs/shortpath/dijkstra.php>.

Bibliography:

1. Tsirel Y.A. The use of infrared radiation detectors to check for contacts and insulators / V.S. Polyakov, Y.A. Tsirel // Power Stations. – 1976. – №1. – P. 51-53. (Rus.)
2. Pat. 104546 Ukraine, IPC H 02 H 5/04. Device for automatic monitoring condition of contact

connections of high-voltage substations and overhead transmission lines / M.D. Dyachenko, Yu.A. Teslya; «Pryazovskyi state technical university» state institution of higher education. – №a201301914; filed 18.02.13, published 10.02.14, Bull. №3. – 4 p.(Ukr.)

3. Dyachenko M.D. Automatic remote monitoring of the contact connections of high voltage equipment of electric networks / M.D. Dyachenko, Yu.A. Teslya // Publication of higher education institutions and associations of energy CIS - Energy. – Minsk, 2013. – №6. – P. 19-24. (Rus.)
4. Ragozin D.V. Modeling synchronized sensor networks / D.V. Ragozin // Problem of programming. – 2008. – №2-3. – P. 721-729. (Rus.)
5. Holger K. Protocols and Architecture for Wireless Sensor Networks / K. Holger, A. Willig. – Chichester : John Wiley & Sons, 2005. – P. 60-62.
6. Information resource: <http://algotlist.manual.ru/maths/graphs/shortpath/dijkstra.php>.

Рецензент: И.В. Жежеленко
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 29.10 2014