

Л. В. ГОЛОВКИНА, канд. техн. наук, доц. ХНУРЭ, Харьков;
А. С. БОРИСЕНКО, асп. ХНУРЭ, Харьков

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КАНАЛА СВЯЗИ И ОБОБЩЕННОГО КРИТЕРИЯ ЖИВУЧЕСТИ

Предложено определение обобщенного критерия живучести в беспроводной сенсорной ZigBee сети с ячеистой топологией при разрушающих действиях и учетом состояния реального канала связи, условной надежности узлов. Задача определения живучести сети сведена к задаче связности графа. Изменения структуры сети в результате разрушающих действий учтены в виде изменения графовой модели. Сделаны выводы о методах маршрутизации, которые используются в оценке состояния канала связи в сети. **Ключевые слова:** обобщенный критерий живучести, вероятность состояния канала связи, условная надежность узлов, граф, разрушающие действия.

Введение. ZigBee сети в условиях разрушающих действий различного характера не могут в полной мере сохранять свою работоспособность. Свойство устойчивости к этим разрушениям характеризуется живучестью как способностью системы сохранять в приемлемых пределах качество и объемы предоставляемого сервиса при выходе из строя ее компонентов или при наличии других разрушающих воздействий. Анализ структурной живучести сводится к задаче связности топологических структур в зависимости от введения понятия «разрушение» [1]. Разрушения приводят к поражению части вершин и ребер графа, и он распадется на неизвестное число компонентов. Задача определения живучести сети является задачей связности графа.

Если сеть представлена в виде модели связным графом, имеет множество путей между двумя произвольными вершинами, то качество каждого канала связи в этом пути и собственно маршрутизация с наличием запасных обходных путей обеспечит повышение живучести. Комплексная оценка состояния канала связи для определения обобщенного критерия живучести становится крайне необходимой.

Анализ основных достижений и литературы. Были получены решения лишь для ограниченного числа графов [2], в некоторых случаях граф сети заменялся бесконечным, асимптотические свойства которого оказывались близкими к точному решению [3]. Для некоторых случаев использовался метод Монте-Карло [4]. Если граф имеет форму решетки, в которой каждая вершина соединена с ближайшими соседними [5], то можно получить приемлемые значения критерия живучести.

Значительный вклад в разработку математических основ анализа живучести систем различного назначения внесли работы И. Ю. Стекольниковой, А. Г. Додонова, Д. В. Ландэ, В. Ф. Крапивина, И. А. Рябиной, Ю. М. Парфенова, Б. С. Флейшмана, Ю. Ю. Громова, О. П. Васильева, К. Е. Юрченко, В. А. Мясникова, Ю. Е. Мельникова, М. Г. Кузнецова, В. М. Вишневого и других.

Проблемами совершенствования методов и алгоритмов маршрутизации в вычислительных сетях занимались такие ученые, как Д. Бертсекас, Д. Гарсиа-Диас, П. Гупта, А.Б. Гольдштейн, Б.С. Гольдштейн, Д. Кантор, О.Я. Кравец, Д.В. Куракин, И.П. Норенков, А. Филипс, С. Флloyd и другие. Анализ методов адаптивной маршрутизации [6] позволяет заключить, что современные методы и алгоритмы построения маршрута для mesh сетей даже с простой топологией не оптимальны, и никак не учитывают состояния реального канала связи и качества самих модулей (узлов), поэтому такая задача остается открытой.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является определение обобщенного критерия живучести ZigBee сети с ячеистой топологией при разрушающих действиях и учетом состояния реального канала связи, условной надежности узлов.

Задача анализа связности графа для ZigBee сети с ячеистой топологией должна учитывать: изменения структуры сети, вероятность состояния канала связи, условную надежность узлов.

Вероятность того, что некоторая вершина k_s и некоторое ребро k_l не будут разрушены, равна соответственно $\sum_{k=0}^{k_s-1} g_k^b(\eta)$ и $\sum_{k=0}^{k_l-1} g_k^p(\eta)$, $g_k^b(\eta)$ и $g_k^p(\eta)$ обозначают ожидаемые части вершин и ребер, которые подверглись разрушающим действиям с частотой η .

Согласно распределению Пуассона для вероятностей:

$$g_k^b(\eta) = e^{-p^b \eta} \frac{(p^b \eta)^k}{k!}, \quad (1)$$

$$g_k^p(\eta) = e^{-p^p \eta} \frac{(p^p \eta)^k}{k!}. \quad (2)$$

Поскольку сеть имеет распределенную структуру, в некоторых случаях разнесенную на большой территории ее физическую структуру представляет простой неориентированный граф.

Для того, чтобы информация о разрушениях и стойкости элементов сети – вершин ζ_b и ребер ζ_p была полной, необходимо ввести понятия

вероятности состояния каналов связи (ребер графа) и учесть условную надежность вершин – Zigbee сенсорных модулей графовой модели в виде

$$\zeta_b = 1 - p^b \nu, \quad (3)$$

$$\zeta_p = 1 - p^p \omega, \quad (4)$$

где ν – условная надежность узлов;

ω – вероятность состояния канала связи, т.к. предполагается учитывать обходные пути, обеспечиваемые методом маршрутизации.

Тогда ожидаемые части вершин и ребер, которые подверглись разрушающим действиям, представим в виде

$$g_k^b(\eta) = e^{-p^b \nu \eta} \frac{(p^b \nu \eta)^k}{k!}, \quad (5)$$

$$g_k^p(\eta) = e^{-p^p \omega \eta} \frac{(p^p \omega \eta)^k}{k!}. \quad (6)$$

Необходимость определения, как условной надежности узлов, так и вероятности состояния каналов связи, приводит к трем основным задачам:

- оценке узлов сети для фирм производителей Zigbee модулей;
- оценке вероятности состояния канала связи при решении задачи оценки качества канала в виде математической простой оптимизационной функции как упорядоченного набора (вектора) из трех обобщенных параметров: надежности, производительности, интеграционной способности;
- учету изменения структуры сети в результате разрушающих действий в виде изменения графовой модели.

Методы решения задач. Для определения количественных характеристик параметра: условной надежности узлов, – данные по модулям фирм–производителей были приведены к безразмерным относительным величинам.

Для значения чувствительности и скорости: чем большее значение, тем лучше показатель качества, поэтому применим формулу для расчета, считая среднее значение параметра, p_{cp} и учтем, что максимальный параметр, p_{mak} (для чувствительности максимальное значение определим в минус 100 дБ, для скорости 250 кбит/с). Определим относительные параметры по формуле

$$p_{отн} = p_{cp} \cdot \left(\frac{1}{p_{mak}} \right). \quad (7)$$

Для мощности, напряжения питания, тока потребления в спящем режиме – относительный показатель рассчитаем с учетом минимальной величины, поэтому мощность передатчика в 1мВт, напряжение питания в 1,5 В, ток потребления в 0,1 мкА примем как наиболее лучшие варианты для модулей и относительные показатели получим относительно этих величин (формула приведена для тока потребления):

$$I_{\text{отн}} = \left(\frac{I_{\text{мин}}}{I} \right). \quad (8)$$

Для определения качества канала связи было предложено использовать весовой метод, и было получено Парето-оптимальное решение [7]. Для определения весовых коэффициентов совокупности показателей качества был использован метод полного факторного эксперимента и определен вектор качества. Тогда взвешенная сумма показателей качества будет записана в виде [8].

$$k_p = 0,34 k_1 + 0,33 k_2 + 0,33 k_3. \quad (9)$$

Показатели качества имеют неодинаковые размерности, поэтому составляющими вектора k_p являются не сами величины k_i , а их нормированные значения.

Единичный показатель «надежность работы» k_1 , который можно обобщить, рассмотрим как усредненную сумму относительных показателей мощности сигнала при передаче и уровня сигнала на входе приемного узла сети как

$$k_1 = \left(\frac{P_p + P_q}{2} \right) \rightarrow \min, \quad (10)$$

где $P_p = \left(\frac{P_{\text{реал}}}{P_{\text{мак}}} \right) \rightarrow \min$ и $P_{\text{реал}}, P_{\text{мак}}$ – реальная и максимальная мощности,

$P_q = \left(1 - \frac{P_{\text{ч реал}}}{P_{\text{ч мак}}} \right) \rightarrow \min$ и $P_{\text{ч реал}}, P_{\text{ч мак}}$ – реальная и максимальная чув-

ствительность.

Для сетей с ячеистой топологией возможна оценка канала связи по производительности с учетом пропускной способности. Соотношение между пропускной способностью сети $Y(p)$ и функционирующей нагрузкой Y_ϕ описывается неравенством

$$Y(p) \leq Y_\phi. \quad (11)$$

Неравенство основано на том, что в состав направления связи может входить несколько каналов связи (ребер графа), и если учитывать, что в общем случае

$$Y(p) = \frac{Y_\phi}{n_m - 1}, \quad (12)$$

где n_m – количество узлов-разветвлений в маршруте.

Поэтому параметр производительности сети с учетом маршрутизации, когда $n_m \rightarrow \min$ рассмотрим в виде

$$k_2 = \frac{1}{Y(p)} \rightarrow \min \quad (13)$$

Количественная оценка интеграционной способности определяется наличием работоспособных каналов связи.

Интеграционная способность k_3 оценивается как

$$k_3 = \frac{\min(M_{ij})}{\sum M_{ij}} \rightarrow \min. \quad (14)$$

где $\min(M_{ij})$ – минимальное количество ребер, соединяющих x_i, x_j вершины, возможен прямой путь из одного ребра;

$\sum M_{ij}$ – суммарное количество ребер графа (всех каналов связи –

«масштаб» развертывания сети).

Вероятность состояния канала связи для одного пути с учетом максимального показателя вектора качества k_{pmax} (наихудший вариант):

$$\omega_p = \sum_{i=1}^{M_{ij}} \frac{\left(1 - \frac{k_{pi}}{k_{pmax}}\right)}{M_{ij}}, \quad (15)$$

где M_{ij} – количество ветвей (ребер), соединяющих x_i, x_j вершины для одного пути.

Вероятность состояния каналов связи при наличии M путей (маршрутов), которые определяются методом маршрутизации

$$\omega = \sum_{i=1}^M \frac{\omega_p}{M}. \quad (16)$$

При решении задачи распада исходного графа на p компонентов и отыскания вероятности того, что граф связан P ($p = 1$) с учетом степени вершин $z(i)$ для x_i и ребер n критерий живучести определяется как [2]

$$P(\rho = 1) \leq 1 - np^z \left[1 - \frac{n-1}{2} p^{z(1-\frac{1}{n})} \right]. \quad (17)$$

Принимая значения $P(\rho = 1) \geq \frac{3}{4}$, выражение (17) можно упростить:

$$P(\rho = 1) \leq 1 - \frac{n}{2} p^z, \quad z \ll n. \quad (18)$$

Для графов, удовлетворяющих условию (18), существует соотношение:

$$\beta = 1 - e^{-\alpha\beta} \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{-\ln(1-\beta)}{\beta}. \quad (19)$$

$$\beta = 1 - \exp \left\{ -z \left[\sum_{k=0}^{k_1-1} g_k^b(\eta) \right] \left[\sum_{k=0}^{k_1-1} g_k^p(\eta) \right] \beta \right\}. \quad (20)$$

Таким образом, выражение (20) определяет среднее количество неразрушенных вершин. Компонента α , учитывая (20), будет иметь в общем случае вид

$$\alpha = z \left[\sum_{k=0}^{k_1-1} g_k^b(\eta) \right] \left[\sum_{k=0}^{k_1-1} g_k^p(\eta) \right] = \frac{-\ln(1-\beta)}{\beta}. \quad (21)$$

Задав $\beta \geq \beta_0$ как коэффициент живучести [2], получим:

$$z \left[\sum_k \frac{(p^b \nu \eta)^k}{k!} \right] \left[\sum_k \frac{(p^p \omega \eta)^k}{k!} \right] \geq \exp^{(p^b \nu + p^p \omega) \eta} \left(\frac{-\ln(1-\beta_0)}{\beta_0} \right). \quad (22)$$

Выражение (22) определяет обобщенный критерий живучести.

В случае разрушения ребер при сохранении вершин (22) приводится к виду

$$z \left[\sum_k \frac{(p^p \omega \eta)^k}{k!} \right] \geq \exp^{p^p \omega \eta} \left(\frac{-\ln(1-\beta_0)}{\beta_0} \right). \quad (23)$$

Результаты исследований. Чтобы подтвердить выкладки, проведем оценку узлов сети для фирм производителей Zigbee модулей.

Результаты усредним по четырем относительным параметрам, определяя условную надежность узлов, см. табл. 1.

Особое внимание уделим модулям XBee-PRO от компании Digi, составляющим сеть, с условной надежностью, равной 0,63.

Основные режимы работы модулей и их параметры, такие как максимальная выходная мощность, 1 мВт (реальная рабочая 0,8 мВт), реальная чувствительность -92 дБ (максимальная -100 дБ) будем исполь-

зовать для определения единичного показателя «надежность работы»

$$k_1 \text{ по формуле (10): } k_1 = \left(\frac{0,8 + 0,08}{2} \right) = 0,44.$$

Таблица 1 – Условная надежность Zigbee модулей

Производители/ общее название модулей	Относительное значение чувстви- тельности	Относительное значение мощно- сти передатчика	Относительное значение для напряжения питания	Относительное значение тока ре- жима энергосбе- режения	Условная надежность
Texas Instruments и Chipcon / CC2420ZRTC+ MSP430xx или eZ430-RF2500	0,89	0,25	0,51	0,25	0,475
Freescale/MaxStream XBee	0,83	1	0,48	0,01	0,58
Atmel и Ember/ ETRX	0,89	0,31	0,55	0,1	0,462
Atmel/AVR Z-Link	0,91	0,33	0,55	0,01	0,45
Jennic/JN5139	0,88	0,33	0,51	0,25	0,492
MaxStreamи Ember / XBee Series 2	0,89	0,5	0,52	0,1	0,502
Digiи Ember/ XBee ZNet 2.5	0,87	0,5	0,52	0,1	0,497
Digiи Ember / XBee-PRO ZB	0,9	1	0,52	0,1	0,63
Radiocraft иChipcon / RC2400(HP)ZNM	0,85	0,25	0,47	0,16	0,432
Ember/модули Embee	0,83	0,5	0,51	0,0006	0,46

Параметр «производительность сети» нельзя определить без учета маршрутизации. В работе[9] представлен анализ ячеистой сети. Некоторые результаты данной работы используем для определения марш-

рутизации различными методами. Для этого представим первоначальную сеть в виде графа, см. рис. 1.

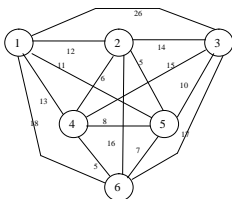


Рис. 1 – Полносвязный граф

Разрушения будем рассматривать в виде разрушения ребер при неузависимости узлов. Действия разрушений представим в виде графа на рис.2.

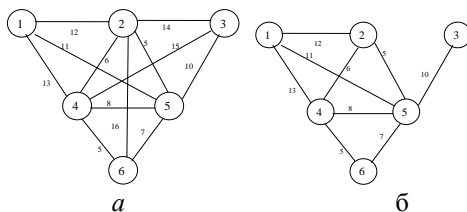


Рис. 2 – Модели сети с последствиями разрушений:
а – разрушение 3-х ребер; б – разрушение 6-ти ребер

Определим передачу данных от 1-й вершины к 6-й. Так как маршрута 1-го порядка не существует (нет прямой связи между вершинами), определим маршруты 2-го порядка. Воспользуемся для определения пути методами Беллмана-Форда, Дейкстры и матричным [9]. Сведем результаты (являющиеся промежуточными по методам Беллмана-Форда, Дейкстры, так как они предполагают связь всех вершин) в таблицу 2.

Таблица 2 – Маршрут от 1 до 6-й вершин графа

Метод определения маршрута (пути)	Разрушение 3-х ребер, последовательность соединения узлов	Разрушение 6-ти ребер, последовательность соединения узлов
Беллмана-Форда	1-5-6	1-5-6
Дейкстры	1-5-6	1-5-6
Матричный $\delta_{i,j} = \min \{(\infty+18); (12+11); (\infty+17); (13+5); (11+7); (\infty+0)\} = 18$	1-4-6 1-5-6 3-го порядка: 1-2-4-6	1-4-6 1-5-6 3-го порядка: 1-2-4-6

Даже для простого сравнения выясняется наличие двух путей 2-го порядка по матричному методу маршрутизации в отличие от только одного возможного варианта для других методов.

Параметр производительности сети с учетом маршрутизации и реальной нагрузки в сети оценим по проведенным экспериментам при осуществлении связи между XBee-PRO Digi модулями с передачей 100 пакетов по 32 байт в течение 10000 мс и, аналогично 100 пакетов по 2 байта. Поэтому $k_2 = 0,003125$ и при меньшем размере пакетов $k_2 = 0,05$.

Количественная оценка интеграционной способности определяется наличием работоспособных каналов связи. При рассмотрении случаев разрушений ребер из 15 ребер для полносвязного графа для случая разрушения 3-х ребер остается только 12, для 6-ти только 9. Поэтому параметр k_3 оценивается как $k_3 = \frac{2}{12} = 0,166 \cdot k_3 = \frac{2}{9} = 0,222$ согласно (14).

Составим взвешенные суммы показателей качества каналов связи для различных условий:

- $k_p = 0,34 \cdot 0,44 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,05 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,166 = 0,1809632$,
- $k_p = 0,34 \cdot 0,44 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,05 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,222 = 0,1890944$,
- $k_p = 0,34 \cdot 0,44 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,00312 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,166 = 0,17415695$,
- $k_p = 0,34 \cdot 0,44 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,003125 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,222 = 0,1823719$.

Анализ показателей качества на этапе оценки каналов связи определяет одну из главных тенденций: при минимальном значении в 3-м случае, следующим приоритетом, определяемый методом маршрутизации, при разрушении 3-х ребер является 1-й, затем 4-й (что подтверждает важность наличия маршрута передачи данных, а не пропускной способности канала даже при разрушении 6-ти ребер), и затем только 2-й случай.

Вероятность состояния канала связи для пути с учетом максимального показателя вектора качества $k_{p_{\max}}$ (наихудший вариант) и весовых значений ребер графа, см. рис. 2, определим для случаев соединения узлов-вершин графовой модели сети для 1-4-6, 1-5-6 :

$$\omega_{p_{1-4-6}} = \frac{\left(1 - \frac{k_{pi}}{k_{p_{\max}}} \frac{V_{1-4}}{V_{\max}}\right) \left(1 - \frac{k_{pi}}{k_{p_{\max}}} \frac{V_{4-6}}{V_{\max}}\right)}{2}, \quad (24)$$

где V_{4-6}, V_{\max} – вес ребра, максимальный вес ребра соответственно, см. рис. 2. Для сети с разрушением 3-х ребер (матричный метод маршрутизации):

$$\omega_{p_{1-4-6}} = \frac{\left(1 - \frac{0,17415695}{0,1809632} \cdot \frac{13}{16}\right) + \left(1 - \frac{0,17415695}{0,1809632} \cdot \frac{5}{16}\right)}{2} = 0,45868$$

Для сети с разрушением 6-ти ребер (матричный метод маршрутизации):

$$\omega_{p_{1-4-6}} = \frac{\left(1 - \frac{0,1823719}{0,1890944} \cdot \frac{13}{13}\right) + \left(1 - \frac{0,1823719}{0,1890944} \cdot \frac{5}{13}\right)}{2} = 0,33231$$

Для сети с разрушением 3-х ребер (матричный метод, метод Беллмана-Форда, Дейкстры) аналогично рассчитаем: $\omega_{p_{1-5-6}} = 0,45866$, с разрушением 6-ти ребер $\omega_{p_{1-5-6}} = 0,332408$. Полученные значения для одинаковых разрушений практически совпадают, так как и в первом случае обнаружения маршрута (1-4-6) и во втором (1-5-6), общий вес ребер одинаковый, равный 18. Но для матричного метода существует два возможных пути, поэтому определим вероятность состояния каналов связи при наличии двух путей как

$$\omega = \frac{\omega_{p_{1-4-6}} + \omega_{p_{1-5-6}}}{2}, \quad \text{равной для разрушения 3-х ребер}$$

$\omega = 0,45867$, при разрушении 6-ти ребер $\omega = 0,332359$.

Для определения обобщенного критерия живучести необходимо учесть характер разрушений, учитывая, что $p^p \eta$ можно считать вместе как

результат разрушения 3-х ребер из 15-ти полностью связного графа, т.е. $p^p\eta=12/15=0,8$, и для разрушения 6-ти ребер считать $p^p\eta=9/15=0,6$. На основании полученных значений выполним оценку обобщенного критерия живучести. Результаты сведем в таблицу 3.

Таблица 3 – Обобщенный критерий живучести с учетом комплексной оценки состояния каналов связи

β_0	$p^p\eta$	ω	$\exp^{p^p\omega\eta} \left(\frac{-\ln(1-\beta_0)}{\beta_0} \right)$	$\exp^{-p^p\omega\eta} \frac{(p^p\omega\eta)^k}{k!}$
0,7	0,8	0,45867	2,4824294629092801571	0,25423307030985052538
0,7	0,8	0,45866	2,4824096035530144138	0,25422956130631540701
0,7	0,6	0,33235	2,0995375428787069098	0,16336299471425933240
0,7	0,6	0,33240	2,0995992701898545714	0,16338227596471113303
0,8	0,8	0,45867	2,9036383283907752728	0,25423307030985052538
0,8	0,8	0,45866	2,9036150993770643253	0,25422956130631540701
0,8	0,6	0,33235	2,4557788136519519156	0,16336299471425933240
0,8	0,6	0,33240	2,4558510146104221718	0,16338227596471113303
0,9	0,8	0,45867	3,6925931462685288187	0,25423307030985052538
0,9	0,8	0,45866	3,6925636056415213360	0,25422956130631540701
0,9	0,6	0,33235	3,1230446048934534003	0,16336299471425933240
0,9	0,6	0,33240	3,1231364237545679123	0,16338227596471113303

Если учесть возможность разрушения и узлов сети, то значение обобщенного показателя будет изменяться. Результаты сведем в табл. 4.

Таблица 4 – Обобщенный критерий живучести

β_0	$p^b \eta$	$p^r \eta$	ν	ω	$\exp^{(p^b \nu + p^r \omega) \eta} \left(\frac{-\ln(1 - \beta_0)}{\beta_0} \right)$
0,7	0,8	0,8	0,63	0,45867	4,1092383819199286097
0,7	0,6	0,6	0,63	0,332359	3,0639872872536887728
0,8	0,8	0,8	0,63	0,45867	4,8064777849735175325
0,8	0,6	0,6	0,63	0,332359	3,5838725965431451243
0,9	0,8	0,8	0,63	0,45867	6,1124578612107895572
0,9	0,6	0,6	0,63	0,332359	4,5576555653296896958

Выводы. Полученные результаты подтверждают необходимость оценки узлов сети – Zigbee модулей по их условной надежности. Комплексная оценка вероятности состояния канала связи при решении задачи оценки качества канала в виде математической простой оптимизационной функции показала интересный результат, связанный с нахождением маршрута разными методами и отсутствие альтернативных маршрутов в методах Беллмана-Форда, Дейкстры, наличием двух маршрутов 2-го порядка для матричного метода, и возможность прокладки маршрута третьего порядка. Подтверждается важность наличия маршрута передачи данных, а не пропускной способности в оценке качества канала связи как в случае разрушения 3-х, так и 6-ти ребер на основании расчетов и измерений, проведенных с реальными модулями XBee-PRO.

Учет изменения структуры сети в результате разрушающих действий в виде изменения графовой модели позволило определить обобщенный критерий живучести, количественные и качественные параметры сети. Состояние повышения живучести определяет необходимость хотя бы частичной работоспособности элементов сети в зависимости от маршрутизации. Для оценки последствий использовались вероятности разрушений вершин и ребер.

Список литературы: 1. Додонов, А. Г. Живучесть информационных систем / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ. – К.: Наук. думка, 2011. – 256 с. 2. Синтез и анализ живучести сетевых систем: монография / Ю. Ю. Громов, В. О. Драчев, К. А. Набатов, О. Г. Иванова. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2007. – 152 с. 3. Bellmore, M. Optimal defense of multicommodity networks / M. Bellmore, H. D. Ratliff // Management Science. – 1971. – vol. 18, № 4. – pp. 174–185. 4. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир 1976. – 165 с. 5. Додонов, А. Г. Введение в теорию живучести вычислительных систем / А. Г. Додонов, М. Г. Кузнецова, Е. С. Горбачик. – Киев: Наукова думка, 1990. – 184 с. 6. Бестугин, А. Р. Контроль и диагностирование телекоммуникационных сетей / А. Р. Бестугин, А. Ф. Богданова, Г. В. Стогов. – С.-Пб.: Политехника, 2003. – 174 с. 7. Борисенко, А. С. Показатели

КАЧЕСТВА СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ Zigbee / А.С. Борисенко, Л.В. Головкина 6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (СЕМСТ-6). (Україна, Одеса, 29 вересня-3 жовтня 2014 р.): Тези доповідей / ред кол.: В.А. Сминтина (гол.ред.); члени редколегії: О.С.Беляев, І.В. Блонський, Я.І. Лепіх [та ін.]. – Одеса: Астропринт, 2014. – 268 с. – С.116. **8.** Борисенко, А.С. Оценка каналов связи сетей Zigbee/ А.С. Борисенко, Л.В. Головкина // А.С. Борисенко, Л.В. Головкина. Сборник научных трудов SWorld. – Выпуск №3 (36). Том 5. Технические науки. – Иваново: Маркова АД, 2014 – 96 с. – С 48–54. **9.** Борисенко, А.С. Методы оптимизации для MESH сети Zigbee / А.С. Борисенко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – 1/9(61). – С. 24–29.

Bibliography (transliterated): **1.** Dodonov, A.G. and D.V. Lande. *Vitality of informative systems*. Kiev: Nauk. dumka, 2011. Print. **2.** *Synthesis and analysis of vitality of the networks systems: monografiya* / Y. Y. Gromov, V. O. Drachev, K. A. Nabatov, O.G. Ivanova. Moscow: «Mashynostroenye-1», 2007. Print. **3.** Bellmore, M. and H. D. Ratliff Optimal defense of multicommodity networks // Management Science, 1971. vol. 18, No 4. 174–185. Print. **4.** Zade, L. A. *Concept linguistic variable and his application to the decision-making close*. Moscow: Myr, 1976. Print. **5.** Dodonov, A.G., M.G. Kuznetcova, E.S. Gorbachik. *Introduction in the theory of vitality of the computer systems*. Kiev: Nauk. dumka, 1990. Print. **6.** Bestugyn, A.R., A.F. Bogdanova, G.V. Stogov. *Control and diagnosing of telecommunications networks*. Canktpeterburg: Polytekhnyka, 2003. Print. **7.** Borisenko A., Golovkina L. Indexes of quality of sensory networks ZigBee Trudy 6-th mezhdunar.Scientific-technical konf. «Sensor electronics and microsystem technologies» (СЕМСТ-6). Odesa: Astroprynt, 2014. 116. Print. **8.** Borisenko A.S., Golovkina L.V. Estimation of communication chennels of networks zigbee. *Collection of scientific papers SWorld*. Issue No 3 (36). Vol. 5. Engineering sciences. Ivanovo: Markova AD, 2014. 48–54. Print. **9.** A. Borisenko Methods of optimization for mesh network in Zigbee // *East Europe Journal of front-rank technologies*, 2013. 1/9(61). 24–29. Print.

Поступила (received) 26.03.2015

УДК 621.331

Д. О. БОСИЙ, канд. техн. наук, доцент, докторант ДНУЗТ,
Дніпропетровськ

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

В статті розглянуто питання виконання розрахунків систем тягового електропостачання в якості складної системи, в якій вимагається враховувати багато різноманітних факторів. Запропоновано методику просторово-часового розрахунку систем тягового електропостачання, яка представляє собою аналітичне описання основних електричних процесів кусочно-заданими функціями двох змінних. Запропоновану методику можна використати до оптимізаційних розрахунків та визначення керуючого впливу при посиленні систем тягового електропостачання або застосуванні підходів керованого електропостачання.

Ключові слова: електрична тяга, система електропостачання, розрахунок, модель, простір, час, графік руху, схема живлення, контактна мережа.

© Д. О. Босий, 2015