

У статті наведено методичний підхід до розв'язання задачі оптимальної реконструкції системи електропостачання промислового підприємства в умовах невизначеності вихідної інформації та багатокритеріальності. На прикладі конкретного підприємства отримано рекомендації щодо реконструкції його системи електропостачання при різних можливостях фінансування

Ключові слова: система електропостачання, реконструкція, багатокритеріальність, оптимізація, невизначеність

В статье представлен методический подход к решению задачи оптимальной реконструкции системы электроснабжения промышленного предприятия в условиях неопределенности исходной информации и многокритериальности. На примере конкретного предприятия получены рекомендации по реконструкции его системы электроснабжения при разных возможностях финансирования

Ключевые слова: система электроснабжения, реконструкция, многокритериальность, оптимизация, неопределенность

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ ЕЕ РЕКОНСТРУКЦИИ

С. А. Тимчук

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий
Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства
ул. Коцарская, 9, г. Харьков, Украина, 61052
E-mail: stym@i.ua

Н. С. Деренько

Кандидат технических наук
Бюджетная организация "Фонд"
ул. Октябрьской революции, 139,
г. Харьков, Украина, 61157
E-mail: N.Semenovich@i.ua

1. Введение

Структурная перестройка экономики Украины на уровне предприятий связана с реструктуризацией, переуплотнением, обновлением технологического оборудования. Это влечет за собой необходимость реконструкции их систем электроснабжения (СЭС) под новые уровни электропотребления и повышения их эффективности. Последнее напрямую связано со снижением потерь и затрат различной природы в СЭС, определение которых осложнено наличием неполноты и неопределенности в исходной информации, многокритериальностью и относительно большой размерностью множества альтернатив. Несмотря на сравнительно большой опыт и научные исследования в данной области, ощущается все же дефицит современных, всесторонне обоснованных рекомендаций и методик.

2. Постановка проблемы

В данной статье рассмотрена проблема принятия оптимального решения по реконструкции системы электроснабжения крупного промышленного предприятия, усложненная многокритериальностью, неопределенностью исходной информации, нели-

нейностью и относительно большой размерностью множества альтернатив.

3. Анализ литературных источников по теме исследования

В работе [1] показано, что проблема неопределенности имеет глобальный характер. Для интегральных показателей эффективности СЭС характерна неопределенность, которая корректно сводится к нечеткости. Однако, крайне мало исследований, направленных на построение математических моделей, учитывающих неопределенность исходной информации. В работах [2, 3] приведен подход к построению математической модели расчета основных технико-экономических показателей эффективности СЭС в нечеткой форме.

Теоретически задача нечеткой оптимизации достаточно полно обоснована в [4, 5]. Однако, исследователи недостаточно внимания уделяют практической реализации этих идей. Попытка восполнить данный пробел приведена в [6]. Здесь доказано, что выбор метода многокритериальной оптимизации зависит от размерности множества альтернатив. Метод попарного сравнения альтернатив рационально применять, когда множество аль-

Таблица 1

тернатив не превышает 10^4 элементов, быстродействующие методы, которые используют нечеткую свертку критериев (нечеткой стратификации целевых функций [7], деформации эллипсоида [8]) - если множество альтернатив не превышает 10^7 элементов, разработанный метод сокращения множества альтернатив [6] эффективен, когда множество альтернатив ограничено размером 10^{12} элементов. Для случаев, когда множество альтернатив имеет размерность, большую 10^{12} , целесообразно применять генетические алгоритмы. Адаптированный к задачам электроснабжения вариант такого алгоритма приведен в [9].

Анализ литературных источников показывает, что практически отсутствуют работы, направленные на построение математических моделей основных технико – экономических показателей эффективности СЭС, учитывающих неопределенность исходной информации, которые можно использовать в качестве целевых функций оптимизации. Выбор же метода оптимизации зависит от сложности конкретной СЭС.

4. Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является выработка рекомендаций по реконструкции конкретной СЭС крупного предприятия. Для этого поставлены следующие задачи: построение математических моделей основных технико – экономических показателей эффективности СЭС, имеющей сложную структуру в нечеткой форме; обоснование метода оптимизации; определение вариантов оптимальных решений по реконструкции конкретной СЭС.

5. Описание исходной СЭС

Дальнейшие рассуждения и выводы приводятся для конкретной СЭС, топологическая схема которой приведена на рис. 1, а ее характеристики – в табл. 1. Необходимость реконструкции СЭС возникла в связи с тем, что в результате изменения экономической ситуации электропотребление предприятия снизилось в 3 раза, соответственно эксплуатационные потери в СЭС стали относительно высокими.

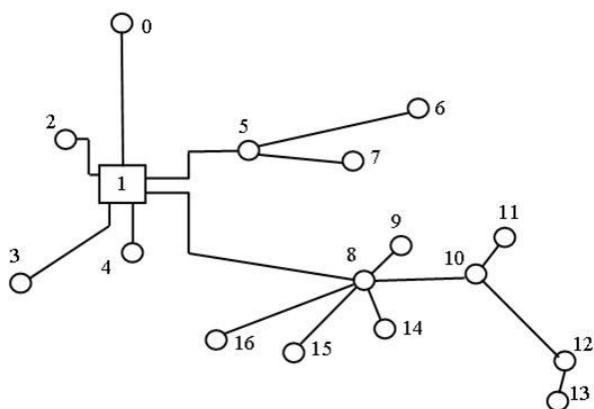


Рис. 1. Расположение трансформаторных подстанций на местности

Исходные данные для расчета

№ п/п	Устройство	Нач. КЛ	Кон. КЛ	L _{кЛ} , км	F _{кЛ} , мм ²	P _{кЛ} , кВт	P _{тр} , кВт
0	ТП35/6 кВ	-	-	-	-	-	-
1	ЦРП	0	1	1	95	3800	0
2	ТП6/0,4 кВ	1	2	0,15	120	250	1000
3	ТП6/0,4 кВ	1	3	0,3	95	500	2x1000
4	ТП6/0,4 кВ	1	4	0,15	180	250	1000
5	РП	1	5	0,15	150	500	0
6	ТП6/0,4 кВ	5	6	0,4	180	250	1000
7	ТП6/0,4 кВ	5	7	0,2	120	250	1000
8	РП	1	8	0,5	180	2300	0
9	ТП6/0,4 кВ	8	9	0,1	120	500	2x1000
10	РП	8	10	0,2	180	800	0
11	ТП6/0,4 кВ	10	11	0,1	180	300	2x630
12	ТП6/0,4 кВ	10	12	0,4	150	500	1000
13	ТП6/0,4 кВ	12	13	0,1	150	250	1000
14	ТП6/0,4 кВ	8	14	0,1	150	250	1000
15	ТП6/0,4 кВ	8	15	0,2	150	250	1000
16	ТП6/0,4 кВ	8	16	0,35	150	500	2x1000

6. Математическая модель технико – экономических показателей эффективности СЭС сложной структуры в нечеткой форме

Для формирования отношения предпочтения между альтернативными решениями используются основные технико-экономические показатели эффективности СЭС: W – интегральный годовой недоотпуск электроэнергии вследствие выхода из строя оборудования СЭС; Z – приведенные затраты на реконструкцию СЭС; N – технологические потери электроэнергии в СЭС.

Расчет указанных показателей связан с учетом неопределенности исходной информации. Согласно методике [2] исходными являются известные детерминированные зависимости, используемые при проектировании СЭС:

$$W = \sum_{i=1}^{ns} T_i \cdot P_i, \quad Z = \sum_{i=1}^{ns} (p_n \cdot K_i + I_i), \quad N = \beta \cdot \sum_{j=1}^{ns} \tau_j \cdot P_{pj}, \quad (1)$$

где T_i, P_i – суммарное время отключения потребителей вследствие выхода из строя i – й подсистемы СЭС и суммарная отключаемая нагрузка вследствие выхода из строя i – й подсистемы СЭС; ns – число подсистем; K_i, I_i – капитальные вложения и эксплуатационные расходы i -й подсистемы; τ – время электроснабжения; β – цена 1 кВт часа электроэнергии; P_p – среднегодовая мощность потерь.

$$T_i = \sum_{j=1}^{nei} \omega_{ij} \cdot \tau_{ij} + \lambda_i \cdot t_i + \lambda_{ki} \cdot t_{ki} = \sum_{j=1}^{nei} \omega_{ij} \cdot \tau_{ij} + k_{pi}, \quad (2)$$

где ω_{ij} – параметр потока отказов j -го элемента i -й подсистемы СЭС; τ_{ij} – среднее время восстановления j -го элемента i -й подсистемы СЭС; $\lambda_i, \lambda_{ki}, t_i, t_{ki}$ – частота и длительность плановых и капитальных ремонтов i -й подсистемы; nei – число элементов в i -й подсистеме.

Эксплуатационные расходы складываются из следующих составляющих:

$$I_i = I_{ai} + I_{pi} + I_{oi} = (\alpha_{ai} + \alpha_{pi} + \alpha_{oi}) \cdot K_i = \alpha_{oi} \cdot K_i \quad (3)$$

$$I_{ai} = \alpha_{ai} \cdot K_i, \quad I_{pi} = \alpha_{pi} \cdot K_i, \quad I_{oi} = \alpha_{oi} \cdot K_i,$$

где I_a включает издержки на капитальный ремонт и накопление средств, необходимых для замены изношенного и морально устаревшего оборудования; I_p включает издержки на текущий ремонт (замена изоляторов, окраска опор и кожухов оборудования подстанций, исправление небольших повреждений, осмотр и профилактические испытания); I_o включает издержки на зарплату эксплуатационного персонала, транспортные расходы; α с соответствующими индексами – это ежегодные отчисления на амортизацию, текущий ремонт, обслуживание.

Стоимость потерь активной электроэнергии в линиях электропередачи (ЛЭП) и трансформаторах (ТП) за год определяется на основе расчета тепловых потерь, связанных с сопротивлением проводов и обмоток трансформаторов

$$N = N_{лэп} + N_{тп}$$

$$N_{лэп} = \beta \cdot \sum_{j=1}^{nl} \frac{\rho_j \cdot P_j^2 \cdot L_j \cdot \tau_j}{U_j^2 \cdot F_j} \quad (4)$$

$$N_{тп} = 3\beta \cdot \sum_{j=1}^{nt} \frac{R_j \cdot P_j^2 \cdot \tau_j}{U_j^2}, \tau_j = 8760 - T_j,$$

где R – сопротивление одной фазы (полюса) трансформатора; ρ – удельное сопротивление проводов; U – напряжение в сети; L – длина ЛЭП; F – сечение проводов; τ – время электроснабжения за год; nl, nt – число ЛЭП и ТП соответственно.

Для расчета разветвленной секционированной СЭС математическая модель (1) – (4) доработана и приобрела более сложный вид, включающий особенности топологии. Для этого введены два вектора: вектор номеров начал участков и вектор номеров концов участков СЭС:

$$I_n = |i_{n1}, i_{n2}, \dots, i_{nny}|^T; \quad I_k = |i_{k1}, i_{k2}, \dots, i_{kny}|^T. \quad (5)$$

С учетом (5) математическая модель (1) – (4) преобразуется к виду:

$$W_{bc} = \sum_{j=1}^{k_1} T_{i_{ni}, i_{ki}} \cdot P_B + \sum_{j=1}^{nc} \sum_{i=k_j}^{k_{j+1}} T_{i_{ni}, i_{ki}} \cdot P_{Bj}$$

$$Z_{bc} = \sum_{i=1}^{ny} Z_{CAi_{ni}, i_{ki}} + Z_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}} + Z_{КАi_{ni}, i_{ki}} + Z_{ТПi_{ni}, i_{ki}},$$

$$N_{bc} = 3 \cdot \rho \cdot \beta \cdot [(8760 - \sum_{i=1}^{k_1} T_{i_{ni}, i_{ki}}) \cdot \sum_{i=1}^{k_1} \frac{P_{i_{ni}, i_{ki}}^2 \cdot Z_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}}}{U_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}}^2 \cdot F_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}}} +$$

$$+ \sum_{j=1}^{nc} (8760 - \sum_{i=k_j}^{k_{j+1}} T_{i_{ni}, i_{ki}}) \cdot \sum_{i=k_j}^{k_{j+1}} \frac{P_{i_{ni}, i_{ki}}^2 \cdot Z_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}}}{U_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}}^2 \cdot F_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}}} +$$

$$+ 3 \cdot \beta \cdot [(8760 - \sum_{i=1}^{k_1} T_{i_{ni}, i_{ki}}) \cdot \sum_{i=1}^{k_1} \frac{P_{ТПi_{ni}, i_{ki}}^2 \cdot R_{i_{ki}}}{U_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}}^2} +$$

$$+ \sum_{j=1}^{nc} (8760 - \sum_{i=k_j}^{k_{j+1}} T_{i_{ni}, i_{ki}}) \cdot \sum_{i=k_j}^{k_{j+1}} \frac{P_{ТПi_{ni}, i_{ki}}^2 \cdot R_{i_{ki}}}{U_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}}^2}].$$

Здесь:

$$P_B = \sum_{i=1}^{ny} P_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}}, \quad P_{Bj} = \sum_{i=k_j}^{ny} P_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}},$$

$$P_{i_{ni}, i_{ki}} = \sum_{j=1}^{ny} P_{ЛЭПi_{ni}, i_{ki}}, \quad (7)$$

$$U_{i_{ki}} = U_{i_{ni}} - \Delta U_{i_{ni}, i_{ki}}, \quad i = 1, \dots, ny,$$

где ny – число участков СЭС.

Таким образом, зависимости (5) – (7) составляют математическую модель, позволяющую рассчитать технико-экономические показатели эффективности СЭС при всем разнообразии элементного состава, схемных решений элементов и топологии СЭС. Данные зависимости являются обобщением и модернизацией известных детерминированных методик расчета технико-экономических показателей эффективности СЭС. Они качественно и усредненно правильны, поскольку отработаны в результате многолетних уточнений. Однако исходные данные, необходимые для расчетов по модели (5) – (7) содержат некоторую степень неопределенности, которая в рамках детерминированного подхода не может быть раскрыта.

Каждый параметр, являющийся исходным данным для математической модели СЭС, как правило, представлен множеством значений, каждое из которых характеризуется степенью принадлежности. Для представления данного нечеткого множества в виде треугольного нечеткого числа, то есть кортежем $P_\Delta = \langle p_m, p_{min}, p_{max} \rangle_\Delta$, необходимо определить носитель нечеткого множества и модальное значение.

Носитель нечеткого множества определяется достаточно просто:

$$p_{min} = \min_i p_i, \quad (8)$$

$$p_{max} = \max_i p_i,$$

где $i = 1, \dots, n$.

Для получения модального значения треугольного нечеткого числа применим метод нечеткого усреднения.

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (9)$$

Таким образом, вместо множества нечетких значений параметра получим треугольное нечеткое число с носителем $\{P_{min}, P_{max}\}$ и ядром (модальным значением) P_m .

Если хотя бы один из параметров, входящих в математическую модель (5) – (7) является нечетким числом, то, согласно обобщенным операциям Заде [10], результаты математических операций будут также нечеткими числами. Соответственно, полученное в результате нечеткое число содержит в себе как значение с наибольшим доверием (модальное), так и интервал неопределенности (носитель множества).

7. Обоснование метода оптимизации

Задача поиска множества недоминируемых альтернатив X может быть сформулирована следующим образом:

$$\begin{aligned} &\text{найти } X \subset G : F(X) \rightarrow \min, \\ &\varphi(X) \leq 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\varphi(X)$ - функциональные ограничения, G – множество альтернатив, F – множество целевых функций.

Принцип Парето в общем случае определяет эффективное решение (недоминируемое) таким, которое не может быть улучшено одновременно по всем целевым функциям при заданных условиях. В контексте поставленной задачи (10) альтернатива x_0 будет недоминируемой, т.е. эффективной по Парето, если

$$f_i(x_0) \geq f_i(x), i = 1, \dots, n, \quad (11)$$

причем, по крайней мере при одном i , неравенство (11) строгое.

Все недоминируемые решения образуют множество Парето X и, если $X \neq \emptyset$, то задача (10) имеет решение.

В случае нечетко заданных целевых функций неравенство (11) однозначно решается только в случае, если сравниваемые нечеткие числа не пересекаются. В противном случае указанное неравенство по сути является нечетким. Для раскрытия данной нечеткости предлагается применить минимаксный критерий принятия решений. Получим следующие соотношения, устанавливающие отношение порядка для треугольных нечетких чисел:

$$\begin{aligned} f_1 \geq f_2, & \text{ if } f_{1min} \geq f_{2min}, \\ f_1 \leq f_2, & \text{ if } f_{1max} \leq f_{2max}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $f_1 = \langle f_{1M}, f_{1min}, f_{1max} \rangle$, $f_2 = \langle f_{2M}, f_{2min}, f_{2max} \rangle$.

Множество целевых функций в данном случае $F = [W, Z, N]$.

$\varphi(X)$ содержит следующие ограничения:

- рассматриваются варианты только кабельных линий электропередач (КЛ);
- сечения проводов берутся из номенклатурного ряда (25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 180) мм²;
- сечение проводов последующего по ходу подачи электроэнергии участка не выше сечения проводов предыдущего участка;
- в качестве коммутирующего аппарата на входе в ТП6/0,4 кВ рассматриваются разъединители и масляные выключатели;
- ТП6/0,4 кВ могут иметь один или два трансформатора, в последнем случае по нижнему напряжению возможно резервирование, выполняемое дежурным энергетиком.

По предварительной оценке размер множества G составил $7,9 \times 10^{28}$ элементов. Поэтому, согласно рекомендациям, приведенным в [6, 9], для решения данной задачи целесообразно применить генетический алгоритм.

8. Определение оптимальных вариантов реконструкции СЭС

В результате оптимизационных расчетов получены три варианта реконструкции СЭС (табл. 2, 3). В данном случае принято, что заменяемое оборудование может быть продано за половину стоимости. Если доход от продажи превышает затраты на закупку и монтаж нового оборудования, то суммарные затраты могут иметь отрицательное значение.

Первый вариант подразумевает реконструкцию всех элементов СЭС. Оптимальное паритетное решение позволяет снизить недоотпуск электроэнергии вследствие выхода из строя оборудования и технологические потери в среднем в 5 раз. При этом приведенные затраты с учетом продажи заменяемого оборудования сведены к минимуму.

Второй вариант подразумевает реконструкцию только трансформаторов, поскольку предварительный анализ показал, что рассматриваемая СЭС (табл. 1) характеризуется относительно короткими участками КЛ относительно большого сечения и поэтому основные потери электроэнергии происходят в трансформаторах. Соответственно, в задаче оптимизации корректируется $\varphi(X)$. Получен вариант реконструкции СЭС, который позволяет снизить потери в трансформаторах в среднем в 5,8 раз, а годовой интегральный недоотпуск электроэнергии – в 2,3 раза. Реализация старых трансформаторов позволит покрыть затраты на реконструкцию и даже получить некоторый доход при наиболее благоприятном исходе сделок купли – продажи.

Третий вариант рассматривает возможность реконструкции СЭС без дополнительных капитальных затрат, за счет оптимальной перестановки существующих трансформаторов. При третьем варианте можно снизить потери в трансформаторах в 4,1 раза, а годовой интегральный недоотпуск электроэнергии – в 2,3 раза. Кроме того, в этом случае освобождается 4 трансформатора 1000 кВт, которые можно реализовать или использовать в качестве резервных.

Таблица 2

Численные значения технико-экономических показателей СЭС

W_{cp} , кВт ч/год	W_{min} , кВт ч/год	W_{max} , кВт ч/год	Z_{cp} , тыс. у.е.	Z_{min} , тыс. у.е.	Z_{max} , тыс. у.е.	N_{cp} , тыс. у.е./год	N_{min} , тыс. у.е./год	N_{max} , тыс. у.е./год
Исходный вариант структуры СЭС								
672415,1	194045,1	1546343	0	0	0	32,1	14,7	56,2
Оптимальный вариант СЭС (вариант 1)								
134068,9	31138,7	312147,6	60,3	-14,7	341,9	6,6	2,4	14,5
Оптимизация трансформаторов (вариант 2)								
295804,2	91490,7	678340,9	-17,1	-95,9	68,2	5,5	1,8	12,4
Перераспределение существующих трансформаторов (вариант 3)								
295804,2	91490,7	678340,9	-51,0	-79,5	-33,3	7,8	2,1	18,6

Таблица 3

Мощности трансформаторов, кВт

№ уч.	Исходный вариант	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1	0	0	0	0
2	1000	400	400	1000
3	2x1000	2x400	630	1000
4	1000	2x250	400	1000
5	0	0	0	0
6	1000	400	400	1000
7	1000	400	400	1000
8	0	0	0	0
9	2x1000	2x400	630	1000
10	0	0	0	0
11	2x630	2x250	400	630
12	1000	2x250	400	630
13	1000	2x250	400	1000
14	1000	2x250	400	1000
15	1000	2x250	400	1000
16	2x1000	2x400	630	1000

9. Выводы

В результате проведенного исследования определены три варианта оптимальной реконструкции СЭС, рассчитанные на разные уровни капитальных затрат. Выбор варианта реконструкции должен обосновываться, исходя из экономического анализа предприятия. На данный момент предпочтителен третий вариант реконструкции.

Следует также отметить, что нечеткие значения технико-экономических показателей для оптимальных решений, приведенные в табл. 2, позволяют оценить возможные диапазоны значений данных параметров, соответственно и оценить риски принимаемых решений.

Литература

- Черемисин, Н. М. Решение задач электроэнергетики в условиях неопределенности целей [Текст] / Н. М. Черемисин, В. И. Романченко // Вісник ХДТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Х: ХДТУСГ, 2004. – Вип. 27. – Т. 1. – С. 18–25.
- Тимчук, С. О. Методика побудови математичної моделі системи електропостачання в нечіткій формі [Текст] / С. О. Тимчук, М. С. Грабовська // Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Х: ХНТУСГ, 2009. – Вип. 87. – С. 81–83.
- Тимчук, С. А. Нечеткая математическая модель расчета недоотпуска электроэнергии в разветвленной секционированной электрической сети 10 кВ [Текст] / С. А. Тимчук, М. А. Сиротенко, И. А. Фурман // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – №1. – С. 54–57.
- Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации [Текст] / С. А. Орловский. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
- Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств [Текст]: пер. с франц. / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
- Тимчук, С. А. Метод сокращения множества допустимых альтернатив в оптимизационных задачах проектирования и реконструкции разветвленной распределительной электросети при нечетко заданных целях [Текст] / С. А. Тимчук, Н. М. Черемисин // Сб. трудов 6 Всеросс. науч.-тех. конф. Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. – Благовещенск: АмГУ, 2011. – Т. 1. – С. 167–171.
- Тимчук, С. А. Методика принятия решения при выборе и анализе структуры распределительных сетей при нечетко заданной цели [Текст] / С. А. Тимчук, Н. М. Черемисин, М. С. Грабовская // Энергетика и электрификация. – 2007. – №8. – С. 45–51.
- Тимчук, С. А. Метод поиска множества недоминируемых решений в нечеткой форме [Текст] / С. А. Тимчук // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): Матеріали 1-ї Міжнар. наук.-техн. Конф. – Черкаси: Маклаут, 2011. – С. 129.
- Тимчук, С. О. Структурна оптимізація розподільчих електромереж в умовах невизначеності [Текст] / С. О. Тимчук // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – №6/1(8). – С.37–38.
- Zadeh, L. A. Fuzzy sets [Текст] / Lotfy Zadeh // Information and Control, 1965. – Vol. 8. – P. 338–353.