

УДК 612.316

**Кирик В.В.,**д-р.техн.наук, професор,  
завідувач кафедри електричних мереж та систем  
НТУУ «Київський політехнічний інститут»;**Губатюк О.С.,**асистент кафедри електричних мереж та систем  
НТУУ «Київський політехнічний інститут»

### **ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДУ ПОШУКУ МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ДЖЕРЕЛ РОЗПОДІЛЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ**

*Анотація. В роботі розглядається задача розміщення генеруючих джерел розподіленої генерації. Запропонований метод пошуку місця розташування та оптимальної потужності джерел розподіленої генерації на основі методу сенсорності вузлів мережі при мінімізації втрат потужності. Представлені результати розрахункового експерименту. Наведена структурна схема нечіткого логічного контролера для прийняття рішень щодо оптимального місця джерела розподіленої генерації.*

*Ключові слова: розподілена генерація, сенсорність вузлів, нечіткий логічний контролер, оптимальна потужність.*

**Кирик В.В.,**д-р.техн.н., професор,  
заведуючий кафедри електрических сетей и систем  
НТУУ «Киевский политехнический институт»;**Губатюк О.С.,**ассистент кафедры электрических сетей и систем  
НТУУ «Киевский политехнический институт»

### **ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ПОИСКА МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МОЩНОСТИ**

*Аннотация. В работе рассматривается задача размещения генерирующих источников распределенной генерации. Предложен метод поиска места расположения и оптимальной мощности источников распределенной генерации на основании сенсорности узлов сети при минимизации потерь мощности. Приведены результаты расчетного эксперимента. Представлена структурная схема нечеткого логического контролера для принятия решения относительно места установки источника распределенной генерации.*

*Ключевые слова: распределенная генерация, сенсорность узлов, нечеткий логический контролер, оптимальная мощность.*

**V. Kyryk;**Doctor of Physical Thechnical Sciences, Professor,  
National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»;**O. Gubatuyk;**Assistant the Chair of Electrical network and systems;  
National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»

## OPTIMIZATION OF THE SEARCH METHOD OF THE DISTRIBUTED GENERATION SOURCES

*Annotation. In the paper are considered the problem of the distributed sources placing. The authors offered search method of the location and the optimum power source of distributed generation which is based on nodes sensory while minimizing power loss. Presented the results of the experimental design. Represented the block diagram of the fuzzy logic controller for a decision regarding the location of the source of distributed generation.*

*Keywords: distributed generation, sensor nodes, fuzzy logic controller, optimal power.*

**Введение.** Проблема интеграции источников распределенной генерации (РГ) в последнее время становится все более актуальной. Наличие источников РГ в энергосистеме Украины позволит улучшить показатели качества электроэнергии, снизить нагрузки в передающих сетях, улучшить режим работы распределительной системы, в частности снизить потери мощности. Децентрализация энергоснабжения с помощью РГ позволит диверсифицировать источники энергии.

Как показывает анализ современного состояния электрических сетей существует объективная необходимость в оптимизации режимов их работы, совершенствовании принципов построения сетей по уровням напряжения и видами исполнения, комплексной автоматизации, повышении надежности, качества и эффективности функционирования сетей с учетом региональных особенностей. Введение РГ обеспечит эффективное управление, модернизацию и инновационное развитие электрических сетей.

Для достижения максимального эффекта от внедрения в сеть РГ особое внимание следует уделить ее месторасположению и вырабатываемой мощности. Как показал обзор зарубежной литературы, для решения данной задачи предлагается множество различных критериев. Рассматриваются экономические, экологические, законодательные критерии и ограничения. Предлагается множество математических моделей и методов. Однако, вместо ожидаемого улучшения параметров электрической сети во многих случаях наблюдается их ухудшение.

**Постановка цели и задач научного исследования.** Целью данной работы является разработка метода определения оптимального месторасположения и мощности РГ при введении ее в энергосистему. Без надлежащего выбора места установки источника РГ, могут возникнуть негативные последствия для распределительной сети, в числе которых повышение напряжения в конечной точке фидера, возникновения небаланса генерации и нагрузки при аварийном разделении электрической сети, увеличение потерь электроэнергии и снижение уровней надежности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить две основные задачи. Во-первых, на основании сенсорного анализа с учетом коэффициентов потерь определить месторасположения источника РГ. Во-вторых, по минимуму потерь определить оптимальную мощность РГ.

**Модель поиска оптимальной мощности и места установки источника РГ.** Узел присоединения источника РГ определяем на основании метода сенсорных узлов. Сенсорный анализ оценки состояния сети позволяет без расчета режима определить наиболее чувствительные элементы. Основная идея данного метода заключается в том, что в электроэнергетической системе (ЭЭС) есть элементы, параметры режима которых в среднем относительно сильнее реагируют на внешние возмущения и больше изменяются при случайных изменениях в топологии схемы сети и нагрузок. Такие элементы называются сенсорными. Кроме того, в электрической сети существуют элементы, изменение параметров режима которых вызывает наиболее сильную реакцию ЭЭС на возмущения. Эти элементы называются слабыми местами [1].

Для определения сенсорных и жестких узлов используем сингулярный анализ обратной матрицы Якоби ( $J^{-1}$ ). Для этого выполним разложение матрицы на ортогональные матрицы  $W$  и  $V$ :

$$\begin{pmatrix} \Delta\delta \\ \Delta U \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = (W \Sigma V^T)^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix},$$

где  $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{2n})$  - диагональная матрица сингулярных значений.

Чувствительность (сенсорность) модулей  $s_{Ui}$  узловых напряжений для схемы из  $n$ -узлов определяют суммой:

$$s_{Ui} = \sum_{j=1}^n \frac{v_{ij} w_{ij}^T}{\sigma_j}.$$

В узлы, которые окажутся наиболее чувствительными к изменению нагрузки узла необходимо установить источник РГ.

Для каждого отдельного узла с увеличением мощности РГ происходит постепенное уменьшение потерь мощности, которое наблюдается до величины оптимального значения [2]. При дальнейшем увеличении мощности источника РГ (сверх оптимального значения) происходит рост потерь.

Для определения оптимальной мощности источника РГ используем известные методики исходя из минимизации суммарных потерь в сети [3, 4]:

$$P_{PGi} = P_{ni} + \frac{1}{\alpha_{ij}} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq 1} \left[ \alpha_{ij} P_j - b_{ij} Q_j \right],$$

$$Q_{PGi} = Q_{ni} + \frac{1}{c_{ij}} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq 1} \left[ c_{ij} Q_j - d_{ij} P_j \right],$$

где  $P_{ni}$ ,  $Q_{ni}$  - активная и реактивная составляющие мощности нагрузки  $i$ -того узла сети;  $\alpha_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $c_{ij}$ ,  $d_{ij}$  - коэффициенты функции потерь [3].

В результате расчета для конкретной электрической сети может быть несколько сенсорных узлов. Поэтому следующий этап является уточнение

мест расположения источников РГ, исходя из минимизации суммарных потерь мощности для этих сенсорных узлов:

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (\Delta P_{\Sigma} + j\Delta Q_{\Sigma}) \rightarrow \min,$$

где  $\Delta S_{\Sigma}$  - полные потери мощности в сети, МВА;  $\Delta P_{\Sigma}$  - активная составляющая потерь мощности, МВт;  $\Delta Q_{\Sigma}$  - реактивная составляющая потерь мощности, Мвар.

**Пример определения месторасположения и мощности источника РГ с помощью предложенной модели.** Моделирование и анализ предложенной методики определения оптимальной места и мощности установки источника выполнен для электрической сети 35 кВ, обобщенная схема и параметры которой приведены на рис.1 и в табл.1 соответственно (примечание: удельное сопротивление линии составляет  $0,25 + j0,4$  Ом/км).

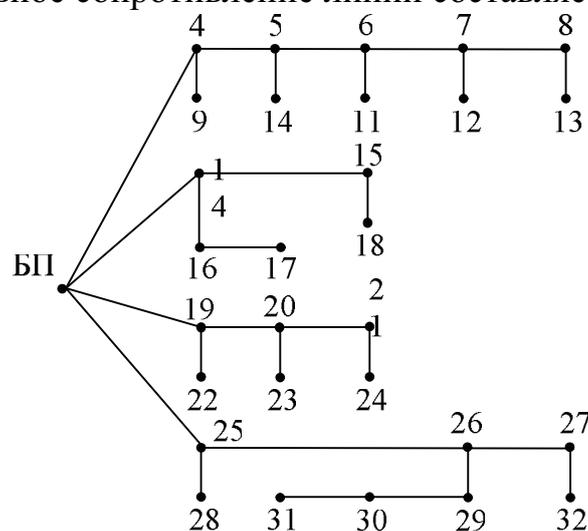


Рис.1. Однолинейная схема тестовой сети

Табл.1. Выходные параметры электрической сети

№ узла	S, МВА	Участок	Длина, км	Участок	Длина, км
9	0,2+j0,45	БП-4	1,3	16-17	3,65
10	2,0+j1,7	БП-14	0,83	19-20	0,92
11	0,54+j0,29	БП-19	1,3	20-21	1,84
12	0,25+j0,1	БП-25	0,1	19-22	0,95
13	2,7+j0,9	4-5	5,48	20-23	0,92
16	0,6+j0,43	5-6	1,83	21-24	0,5
17	3,2+j0,95	6-7	0,3	25-26	3,71
18	2,5+j1,18	7-8	2,96	26-27	11,2
22	1,0+j0,45	4-9	5,5	25-28	5,5
23	0,56+j0,675	5-10	4,4	26-29	6,2
24	0,82+j0,9	6-11	5,4	29-30	9,4
28	2,0+j0,15	7-12	0,66	30-31	6,92
29	1,3+j0,4	8-13	0,98	27-32	3,47
30	1,8+j0,7	14-15	1,5		
31	0,78+j0,73	15-18	0,5		
32	0,7+j0,675	14-16	3,92		

Для данной схемы была составлена матрица Якоби, выполнено ее сингулярное разложение и определены сенсорные узлы по модулю напряжения (рис.2); рассчитана оптимальная мощность источника РГ для каждого узла электрической сети (табл.2).

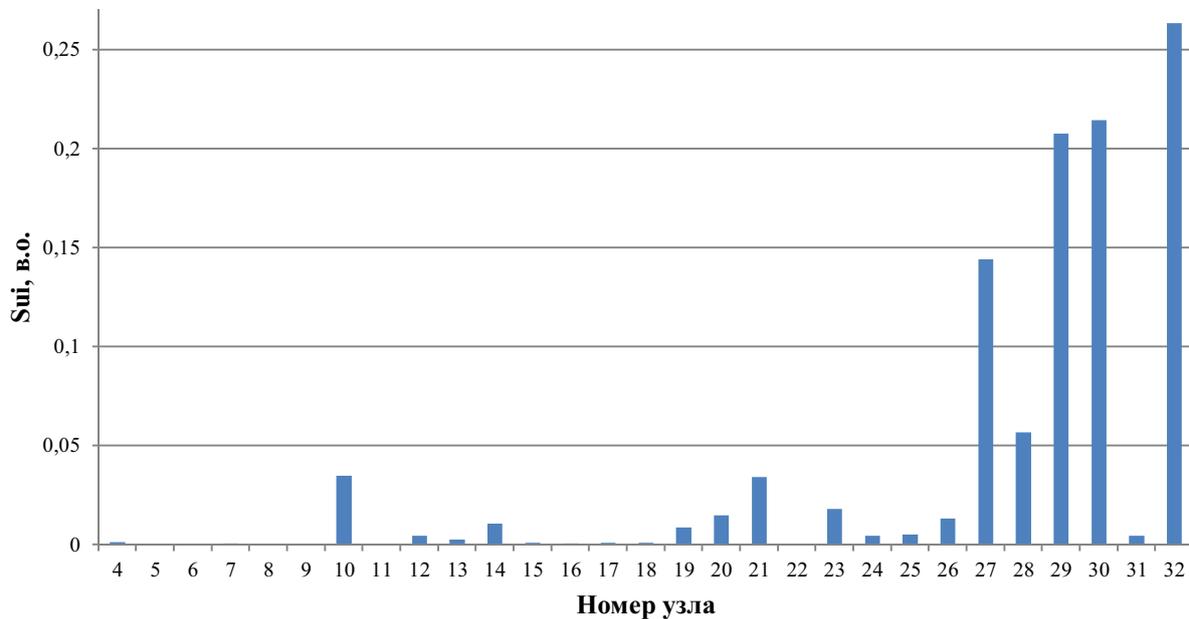


Рис. 2. Определение сенсорных узлов с помощью матрицы Якоби

Установлено, что для данной тестовой сети сенсорными узлами являются узлы №32, 29, 30, 13, 27.

Табл. 2. Значение оптимальной мощности, суммарных потерь и коэффициентов потерь активной мощности в тестовой сети

№ узла	Оптимальная мощность источника РГ, МВт	Сумарні потери в сети, МВА	Коэффициент потерь активной мощности, о.е.
32	0,7	0,2-j0,3	0,385
29	5,2	0,17-j0,28	0,629
30	5,9	0,16-j0,25	0,731
13	2,7	0,14-j0,22	0,978
27	0,9	0,197-j0,303	0,385

Согласно значениям коэффициентов потерь активной мощности (табл.2) очевидно, что наиболее выгодным является установка источника РГ в узле №13 с оптимальной мощностью 2,7 МВт.

На рис. 3 представлены графики изменения напряжения до и после установления источника РГ в узле №13.



Рис. 3. Графік изменения напряжения в тестовой сети до и после установки источника РГ

Таким образом, установка источника РГ в узле №13 оказывает положительное влияние на режим напряжения сети.

Полученные результаты стали основой для создания нечеткого логического контроллера, структурная схема которого представлена на рис.4.

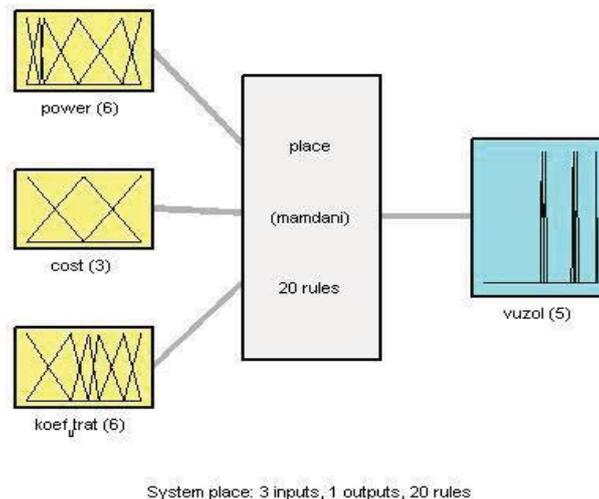


Рис. 4. Структурная схема нечеткого логического контроллера

В качестве входных переменных НЛК выступают мощность источника РГ, (6 треугольных функций принадлежности, которые отражают определенную оптимальную мощность источника РГ в сенсорных узлах) (рис.5а); дисконтированные затраты на строительство электростанции с РГ (3 треугольные функции принадлежности)(рис.5б); коэффициент потерь активной мощности (6 треугольных функций принадлежности) (рис.5в). Выходная лингвистическая переменная

формировалась исходя из определенных значений сенсорности узлов и представлена 5-ю синглтонами (рис.5г).

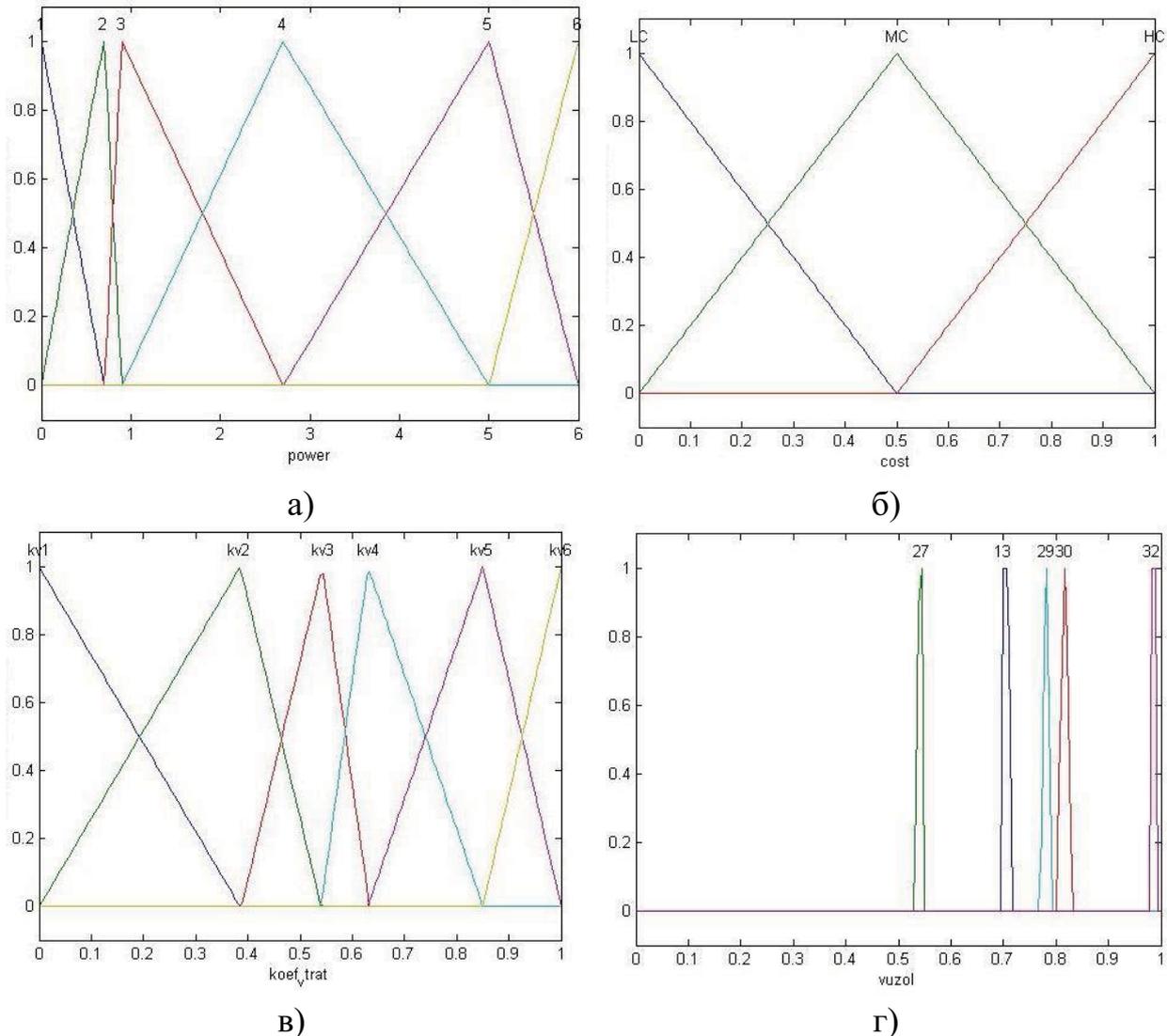


Рис. 5. Входные (а,б,в) и выходная (г) переменные НЛК

**Выводы.** Задача оптимизации месторасположения и мощности источников распределенной генерации в энергосистеме является одной из первоочередных и требует тщательного рассмотрения на стадии проектирования.

В полном объеме получить преимущества от введения источников распределенной генерации возможно лишь при выборе верного метода поиска оптимального места подключения и мощности генерирования источников распределенной генерации.

В предложенном методе мощность источника распределенной генерации следует выбирать по минимуму потерь полной мощности в сети. Узел расположения источника распределенной генерации определяется исходя из его сенсорности при минимизации потерь мощности.

Повышение эффективности регулирования напряжения в распределительных сетях в условиях введения источников распределенной генерации является важной научно-технической задачей, решение которой позволит приблизить уровень напряжения в системе до оптимального значения, при условии минимизации потерь электрической энергии соблюдая нормы ее качества.

На практике, выбор лучшего месторасположения источника распределенной генерации не всегда возможен. Однако, предложенные этапы метода могут быть использованы отдельно. В частности, для известной мощности источника распределенной генерации возможно определить оптимальное место или суммарные потери в сети.

***Использованные источники информации:***

1. Лежнюк П.Д. Оцінка чутливості втрат потужності в електричних мережах: монографія / П.Д. Лежнюк, В.О.Лесько. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 120 с.
2. Чечушков Д.А. Метод оптимального размещения источников распределенной генерации для повышения надежности электроснабжения / Д.А. Чечушков, Т.Ю. Паниковская, Е.А. Бунькова // Промышленная электроника. - 2014. - №9. - С. 17-21.
3. Лежнюк П.Д. Оптимизация схем подключения нетрадиционных и возобновляемых источников электроэнергии в электрических сетях /П.Д. Лежнюк, С.В. Кравчук// Вестник Черниговского государственного технологического университета. - 2013. - №2 (65). - С. 168-173.
4. Jegadeesan M. Optimal Sizing and Placement of Distributed Generation in Radial Distribution Feeder Using Analytical Approach / M. Jegadeesan, V. Keerthana// International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. - 2014. - Vol.3. - Pp. 358-364.

***References:***

1. Lezhnyuk P.D. OtsInkachutlivostIvtratpotuzhnostIvelektrichnihmerezah: monograflya / P.D. Lezhnyuk, V.O.Lesko. – VInnitsya: VNTU, 2010. – 120 s.
2. Chechushkov D.A. Metod optimalnogorazmescheniyaistochnikovraspredelennoygeneratsiidlyapovyisheniyanadezhnostielektrosnabzheniya / D.A. Chechushkov, T.Yu. Panikovskaya, E.A. Bunkova // Promyishlennayaelektronika. - 2014. - #9. - S. 17-21.
3. Lezhnyuk P.D.Optimizatsiyashempodklyuchenianetraditsionnyihivozobnovlyaemyihistochnikovelektroenergiivelektricheskikhsetyah /P.D. Lezhnyuk, S.V. Kravchuk// VestnikChernigovskogogosudarstvennogotekhnologicheskogouniversiteta. - 2013. - #2(65). – S.168-173.
4. Jegadeesan M. Optimal Sizing and Placement of Distributed Generation in Radial Distribution Feeder Using Analytical Approach / M. Jegadeesan, V. Keerthana// International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. - 2014. - Vol.3. - Pp. 358-364.

*Рецензент: д.т.н., проф.Лисенко О.І.*