

Запропоновано алгоритм, який дозволяє зменшити кількість ітерацій при пошуку оптимального за пріоритетними для особи, що приймає рішення, критеріями розташування засобів підвищення надійності в розподільчих мережах 10 кВ. Наведено результати досліджень залежності оптимальних рішень щодо типів, кількості і схем розташування пристроїв від параметрів, як розгалужених резервованих, так і нерезервованих електричних мереж

Ключові слова: розподільча електромережа, надійність, секціонування, ефективність, оптимізація, алгоритм

Предложен алгоритм, который позволяет уменьшить количество итераций при поиске оптимального по приоритетным для лица, принимающего решения, критериям размещения средств повышения надёжности в распределительных сетях 10 кВ. Приведены результаты исследований зависимости оптимальных решений по типу, количеству и схемам размещения устройств от параметров, как разветвлённых резервированных, так и нерезервированных электрических сетей

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, надёжность, секционирование, эффективность, оптимизация, алгоритм

УДК 621.311

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.54626

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ В РАЗВЕТВЛЁННЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 10 КВ

С. А. Тимчук

Доктор технических наук, доцент*

E-mail: stym@i.ua

М. А. Сиротенко

Ассистент*

E-mail: sirotenko89@i.ua

*Кафедра автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий
Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства им. П. Василенко
ул. Энгельса, 19, г. Харьков, Украина, 61052

1. Введение

Несмотря на совершенствование конструкции воздушных линий электропередачи, посредством которых осуществляется распределение электрической энергии между потребителями, аварийные отключения в системах электроснабжения неизбежны.

Так, с учетом всех причин, время, в течение которого условный потребитель в Украине не получает услуг по электроснабжению в течение года, в среднем составляет более 20 часов, что более чем в 12 раз превышает аналогичный показатель за границей [1].

Одним из основных факторов, влияющих на величину времени восстановления электроснабжения, является время, затрачиваемое на обнаружение повреждённого участка сети. Уменьшить это время позволяет установка дополнительных средств повышения надёжности (СПН): указателей повреждённых участков цепи, а также линейных разъединителей и автоматических секционирующих устройств, которые помимо основного эффекта от секционирования также позволяют снижать время поиска места повреждения.

Однако, несмотря на распространённость и разнообразность средств, применяемых для повышения надёжности электроснабжения в линиях электропередачи (ЛЭП) напряжением 10 кВ, научно обоснованной и практически приемлемой методики, позволяющей осуществлять выбор оптимального количества и

места установки при одновременном использовании в системе повышения надёжности сразу нескольких видов СПН, предложено не было. Задача оптимизации усложняется также большим количеством возможных вариантов размещения устройств в сети, что делает невозможным применение метода полного перебора «brute force». В связи с этим разработка алгоритма поиска оптимального размещения СПН в разветвлённой распределительной сети является актуальной задачей.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Разрешение проблемы оптимизации размещения секционирующих аппаратов и устройств для поиска повреждённых участков сети в литературе рассматриваются, в основном, отдельно.

В [2] предложена методика, которая позволяет, при наличии на питающем вводе понижающей подстанции фиксирующих приборов, определять расстояния до места короткого замыкания (КЗ) на присоединениях 6–10 кВ с уточнениями, учитывающими влияние переходного сопротивления в месте КЗ. Однако данный подход к решению задачи поиска места повреждения является неэффективным при наличии в сети большого количества ответвлений.

С целью решения данной проблемы в статьях [3, 4] рассмотрены методы «двухстороннего» определения КЗ на высоковольтных ЛЭП и представлены алгоритмы, позволяющие выявлять повреждённое присоединение. А в методике [5] используется алгоритм, основанный на определении повреждённого участка с последующим уточнением расстояния до места повреждения. При этом возможности программного обеспечения по результатам регистрации параметров аварийного режима приведены в [6].

При выборе же мест установки указателей повреждённого участка в [7] считаются целесообразными места на ответвлениях, осмотр состояния которых при поиске места повреждения приходится производить пешком, а протяжённость равна или превышает 2–2,5 км.

Методики, позволяющие оптимизировать уровень надёжности распределительной сети за счёт размещения коммутационных аппаратов, описаны в [8, 9]. Так в [8] было обосновано распределение выбора показателей надёжности при договорных отношениях и предложена методика расчета надёжности электроснабжения на вводе у потребителей. А в [9] была описана методика, основанная на методе зонных структур и позволяющая достигать требуемого уровня надёжности для определенных потребителей.

В работах [10, 11] описаны подходы к повышению надёжности электроснабжения потребителей в распределительных сетях посредством их расколькоывания и оснащения автоматическими КА. Такой подход обеспечивает повышенную устойчивость, а также процесс так называемого самозаживления сети, однако при этом характеризуется дороговизной реализации.

Следует отметить, что все вышеперечисленные методики имеют ряд недостатков, к основным из которых следует отнести невозможность их применения в случае, когда в системе повышения надёжности присутствуют различные типы устройств и отсутствие обоснования места и схемы размещения СПН.

В [12, 13] раскрыты основные принципы и методы, лежащие в основе математического описания процессов функционирования разветвлённой распределительной сети. Предложена методика, позволяющая при оптимизации системы повышения надёжности ЛЭП учитывать возможность наличия в её составе различных типов указателей повреждённых участков и секционирующих аппаратов, топологию сети, мощность электроустановок каждого из потребителей, а также их категорию. К недостаткам же предложенной методики следует отнести огромное количество итераций выполняемых при поиске оптимальной схемы размещения СПН, что делает затруднительным сам процесс оптимизации при наличии в схеме распределительной сети уже 5–6 ответвлений.

Таким образом, для проведения исследования влияния параметров ЛЭП на ожидаемый результат оптимизации системы повышения надёжности в разветвлённой распределительной сети необходимо разработать алгоритм, позволяющий уменьшить количество выполняемых при этом итераций. Кроме того, данный расчётный эксперимент может помочь лицу, принимающему решение (ЛПР), при выборе типа и места установки СПН в типовой распределительной сети 10 кВ.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является определение наиболее эффективных типов устройств, применяемых для повышения надёжности, а также определение эффекта от оптимизации количества и мест их размещения в типовых распределительных сетях 10 кВ.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать алгоритм, позволяющий уменьшить количество итераций, выполняемых в процессе оптимизации количества и мест размещения СПН;
- определить оптимальный состав системы повышения надёжности для типовых распределительных сетей 10 кВ при различных сочетаниях параметров ЛЭП;
- определить эффект от установки оптимальной системы повышения надёжности в типовых распределительных сетях 10 кВ при различных сочетаниях параметров ЛЭП.

4. Алгоритм поиска оптимального решения по приоритетным критериям для лица, принимающего решения

С целью решения поставленной задачи проведём математический эксперимент, в ходе которого произведём полный перебор всех возможных вариантов размещения СПН, предусмотренных методикой [12, 13], для типовых схем, представленных на рис. 1. При этом конечное множество альтернатив X разобьём на непересекающиеся классы X_i :

$$X = X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_k : X_i \cap X_j = \emptyset, \text{ при } \forall i, j \in \{1; \dots; k\}, i \neq j, (1)$$

где k – соответствует общему количеству точек в сети, установка аппаратов в которых может быть целесообразной; i – соответствует количеству точек, в которых установлены аппараты, в текущей альтернативе.

Множество недоминируемых альтернатив, определённое в ходе двухкритериальной оптимизации системы повышения надёжности типовой распределительной сети, представленной на рис. 1, а, а также единственные решения при приоритете приведенных затрат, эффекта от установки СПН и Паритете обоих критериев представлены на рис. 2 и в табл. 1 соответственно.

В табл. 1 условно обозначено, что варианту «а» соответствует установка указателя повреждённого участка, варианту «в» – установка линейного разъединителя совместно с указателем повреждённого участка, позволяющим передавать информацию о месте повреждения на диспетчерский пункт, а варианту «г» – установка автоматического секционирующего аппарата (реклоузера). Следует отметить, что помимо вариантов, указанных в табл. 1, в ходе проведения математического эксперимента для каждого потенциального места установки рассматривалась ещё одна альтернатива «б» – установка указателя повреждённого участка, позволяющего передавать информацию о месте повреждения на диспетчерский пункт [13]. Проведенное расчётное исследование показало, что оптимальная схема размещения СПН при приоритете одного из критериев для i точек, занимаемых аппаратами, всегда включает оптимальную схему размещения СПН при приоритете того же критерия для $(i-1)$ точек.

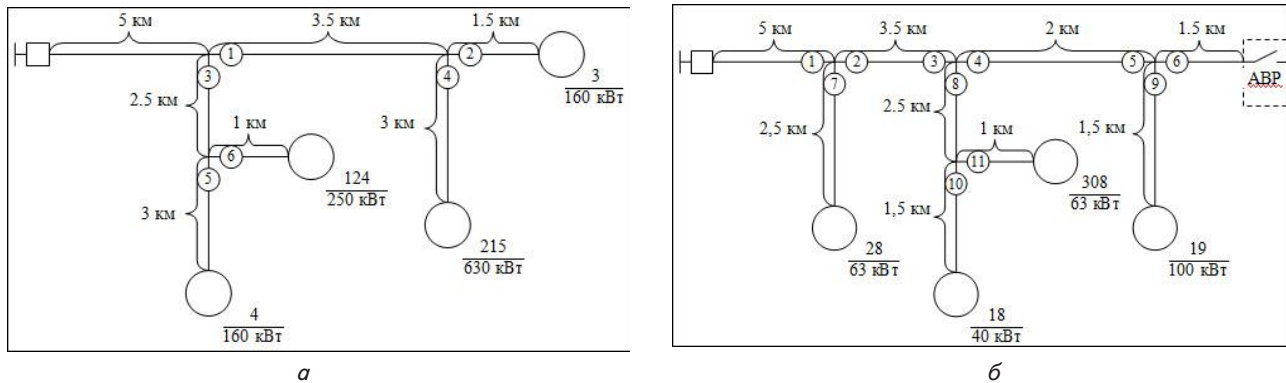


Рис. 1. Схемы типовых распределительных сетей 10 кВ: а – без резервирования, б – с резервированием

Таблица 1

Оптимальная схема размещения СПН по приоритетным для ЛПР критериям для *i* точек, занимаемых аппаратами

Единственное решение по приоритету:	Количество точек <i>i</i>	Вариант аппарата в потенциальном месте установки СПН					
		1	2	3	4	5	6
приведенных затрат $Z_{np.}$	<i>i</i> =1	-	-	a	-	-	-
	<i>i</i> =2	-	-	a	a	-	-
	<i>i</i> =3	-	-	a	a	a	a
	<i>i</i> =4	-	a	a	a	a	a
	<i>i</i> =6	a	a	a	a	a	a
эффекта от установки СПН Eff	<i>i</i> =1	-	-	г	-	-	-
	<i>i</i> =2	г	-	г	-	-	-
	<i>i</i> =3	г	г	г	-	-	-
	<i>i</i> =4	г	г	г	-	-	г
	<i>i</i> =6	г	г	г	г	г	г
при паритете обоих критериев	<i>i</i> =1	-	-	в	-	-	-
	<i>i</i> =2	в	-	в	-	-	-
	<i>i</i> =3	в	-	в	a	-	-
	<i>i</i> =4	в	-	в	a	-	a
	<i>i</i> =6	в	a	в	a	a	a

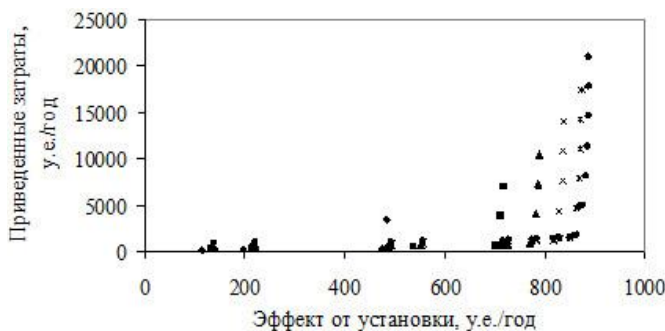


Рис. 2. Множество недоминируемых решений для каждого класса X_i

Данное свойство системы позволило разработать алгоритм поиска рациональных решений, значительно снижающий количество итераций, выполняемых при поиске оптимального решения по приоритетным для ЛПР критериям.

Разработанный алгоритм состоит из $2 \cdot k + 1$ шагов. На каждом шаге $m = 2 \cdot i - 1, i = 1, k$ происходит синтез множеств альтернатив $X_{Eff(i)}, X_{Z_{np.}(i)}$ и $X_{Opt(i)}$, необходи-

мых для поиска единственных решений по приоритетным критериям в пределах класса X_i . Так как каждая альтернатива x_i является собой множество элементов, каждый из которых определяет тип аппарата и место его установки, то условие, по которому формируются альтернативы, можно представить в следующем виде:

– для множества $X_{Eff(i)} \subset X_i$, необходимого для поиска единственного решения по приоритету эффекта от установки СПН:

$$X_{Eff(i)} = \{X_i | X_i \supset r_{Eff(i-1)}, r_{Eff(0)} = \emptyset\}; \tag{2}$$

– для множества $X_{Z_{np.}(i)} \subset X_i$, необходимого для поиска единственного решения по приоритету приведенных затрат на установку СПН:

$$X_{Z_{np.}(i)} = \{X_i | X_i \supset r_{Z_{np.}(i-1)}, r_{Z_{np.}(0)} = \emptyset\}; \tag{3}$$

– для множества $X_{Opt(i)} \subset X_i$, необходимого для поиска единственного решения при Паритете обоих критериев:

$$X_{Opt(i)} = \{X_i | X_i \supset r_{Opt(i-1)}, r_{Opt(0)} = \emptyset\}; \tag{4}$$

Поиск единственных решений $r_{Eff(i)}, r_{Z_{np.}(i)}$ и $r_{Opt(i)}$ в пределах класса X_i выполняется на каждом шаге $m = 2 \cdot i, i = 1, k$. Для этого из множеств альтернатив, синтезированных на предыдущем этапе, выбираются решения удовлетворяющие условиям (5)–(7) соответственно.

$$r_{Eff(i)} \in \underset{y_i \in \underset{x_i \in X_{Eff(i)}}{\operatorname{argmax}}(\operatorname{Eff}(x_i))}{\operatorname{argmin}} z_{np.}(y_i), \tag{5}$$

$$r_{Z_{np.}(i)} \in \underset{y_i \in \underset{x_i \in X_{Z_{np.}(i)}}{\operatorname{argmin}}(z_{np.}(x_i))}{\operatorname{argmax}} \operatorname{Eff}(y_i), \tag{6}$$

$$r_{Opt(i)} \in \underset{x_i \in X_{Opt(i)}}{\operatorname{argmin}} \left((\operatorname{Eff}(x_i) - \operatorname{Eff}_{\text{perf}})^2 + (z_{np.}(x_i))^2 \right), \tag{7}$$

где $\operatorname{Eff}_{\text{perf}}$ – это ожидаемый среднегодовой ущерб от перерывов в электроснабжении потребителей без СПН, у.е./год.

На шаге $m = 2 \cdot k + 1$ выполняется поиск недоминируемых альтернатив и единственных решений по приоритетным для ЛПР критериям на множестве Z , полученном в ходе реализации предыдущих этапов алгоритма, где Z определяется как:

$$Z = \{r_{Eff(1)}, \dots, r_{Eff(k)}\} \cup \{r_{Z_{np.}(1)}, \dots, r_{Z_{np.}(k)}\} \cup \{r_{Opt(1)}, \dots, r_{Opt(k)}\}. \tag{8}$$

На рис. 3 на множестве исходных альтернатив X показано множество недоминируемых решений, полученное в ходе реализации разработанного алгоритма.

При этом установлено, что множество Z всегда включает единственные решения по приоритетным для ЛПР критериям, определяемые для всего множества X .

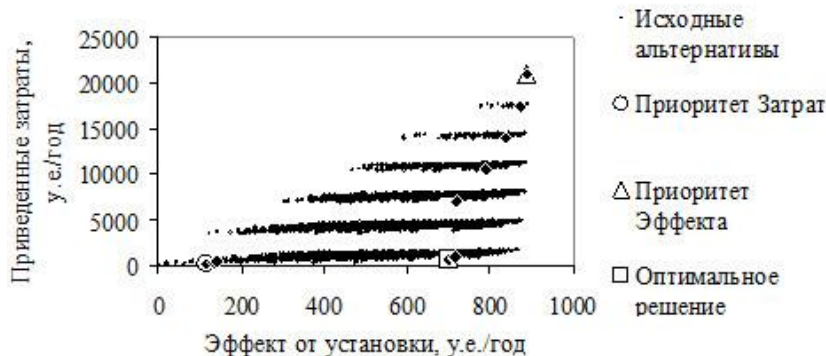


Рис. 3. Множество недоминируемых решений для множества Z с указанием единственного решения по приоритетным для ЛПР критериям

5. Исследование влияния параметров линии электропередачи на состав оптимальной системы повышения надёжности

При поиске оптимального количества и мест установки СПН в распределительных сетях 10 кВ используется математическая модель, в основе которой лежат выражения, переменными параметрами в которых являются следующие величины: S_i – потребляемая мощность электроустановок i -го потребителя, кВА; l_i – длина i -го участка магистрали, м. В общем случае следует ожидать, что в диапазоне изменения этих параметров будет меняться и единственное паритетное решение.

Для проверки этого предположения проведём расчетное исследование с использованием вычислительной программы, описанной в [14], которая реализует модели [12, 13], а также предложенный алгоритм, снижающий количество итераций при переборе альтернатив.

На рис. 4, *a, б* показано как будет меняться оптимальная схема размещения СПН при паритете критериев приведенных затрат и эффекта от установки в зависимости от сочетаний мощности электроустановок S_i и длины ЛЭП от источника питания до i -го потребителя в резервируемой и резервируемой распределительных сетях соответственно.

Проведенный расчётный эксперимент показал (рис. 4), что в разветвлённых одноцепных сетях 10 кВ как при малых, так и больших мощностях электроустановок потребителей наиболее эффективной является установка линейного разъединителя совместно с указателем повреждённого участка, позволяющим передавать информацию о месте повреждения на диспетчерский пункт.

В то же время установка СПН в сетях с резервированием является более дорогостоящей, ввиду необходимости установки хотя бы одного автоматического секционирующего аппарата на магистрали линии, и, как следствие, эффективной только при больших (свыше 250 кВА) мощностях электроустановок потребителей.

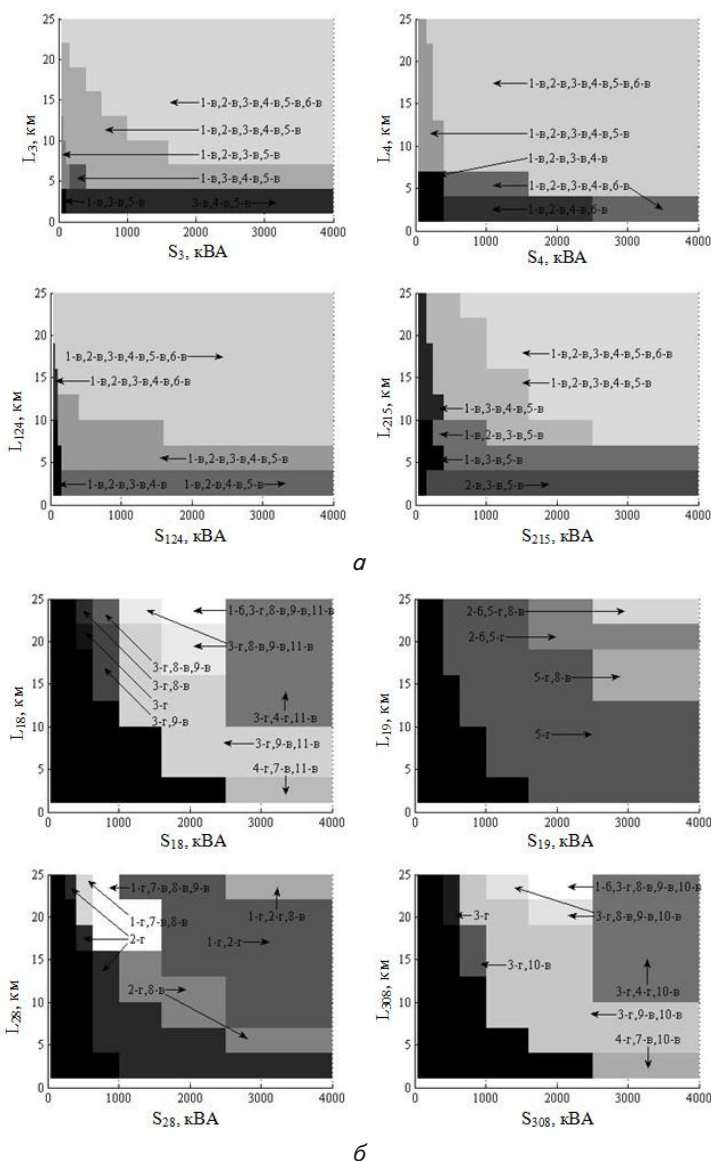


Рис. 4. Изменение оптимальной схемы размещения СПН при паритете критериев в зависимости от сочетаний параметров ЛЭП: *a* – в резервируемой сети, *б* – в резервируемой сети

6. Исследование влияния параметров линии электропередачи на эффект от установки оптимальной системы повышения надёжности

Проведём исследование влияния того, как зависит эффект от установки системы повышения надёжности в нерезервируемой и резервируемой распределительных сетях 10 кВ от оптимальной схемы размещения устройств, выбранной для определенного сочетания мощности и длины ЛЭП от

источника питания до *i*-го потребителя. Результаты данного исследования представлены на рис. 5, *a, б* соответственно.

Проведенный расчётный эксперимент показывает, что установка оптимальной системы повышения надёжности по приоритетным для ЛПР критериям, в зависимости от сочетания параметров ЛЭП, позволит снизить ожидаемый ущерб от годового недоотпуска электрической энергии до 83 % в сети без резервирования и до 90 % в сети с резервированием.

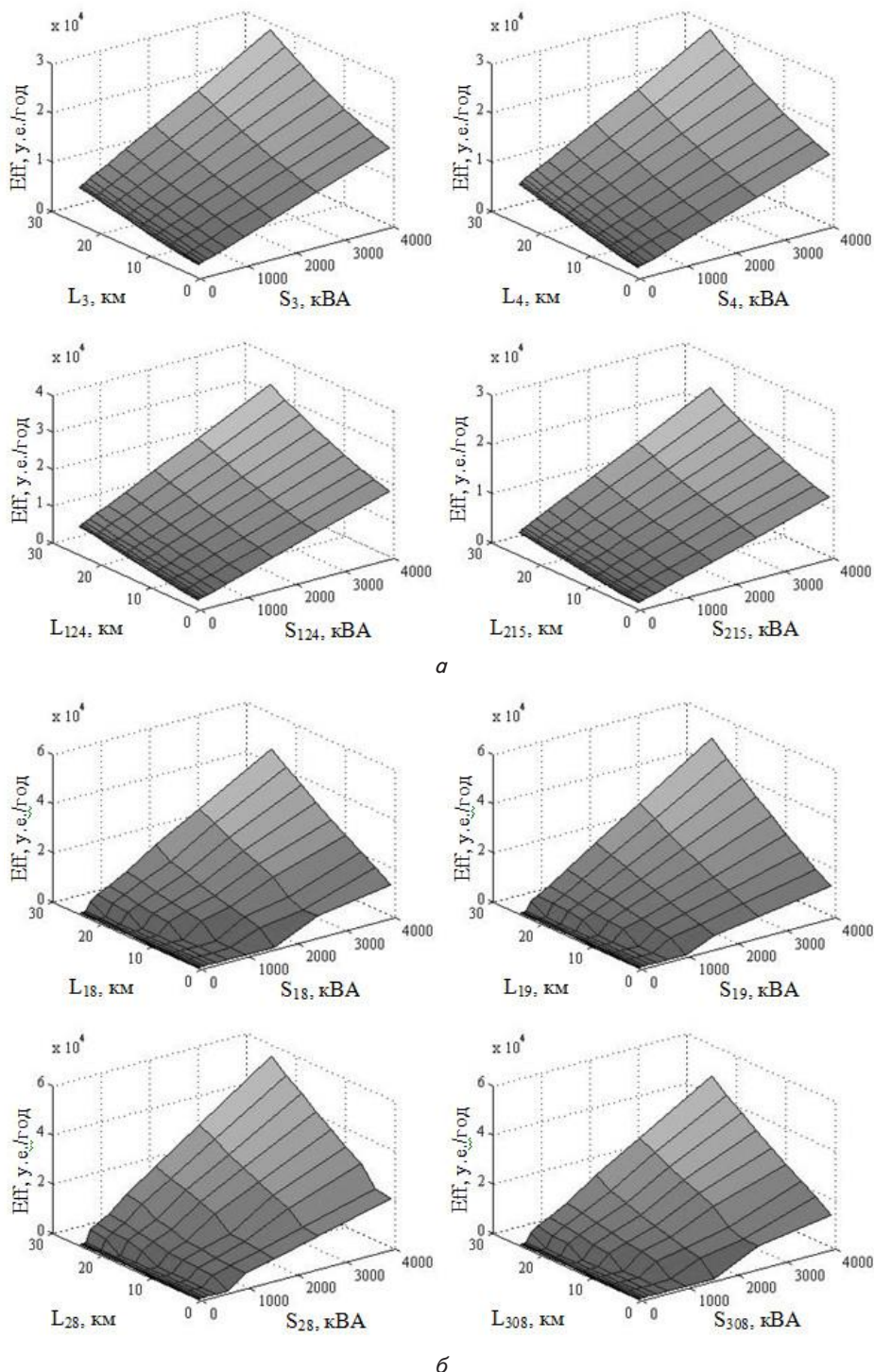


Рис. 5. Изменение величины эффекта от установки СПН в зависимости от сочетаний параметров ЛЭП: а – в нерезервируемой сети, б – в резервируемой сети

7. Исследование влияния параметров линии электропередачи на величину времени поиска места повреждения при установленной оптимальной системе повышения надёжности

Покажем, как в зависимости от сочетания мощности и длины ЛЭП от источника питания до *i*-го потребителя, а также выбранной для каждого сочетания оптимальной схемы размещения СПН, изменяется величина времени поиска места повреждения в сети.

Результаты данного эксперимента для нерезервируемой и резервируемой распределительных сетей представлены на рис. 6, *а*, *б* соответственно.

Проведенное расчётное исследование показало, что установка оптимальной системы повышения надёжности по приоритетным для ЛПР критериям, позволит снизить ожидаемое среднее время, затрачиваемое ремонтной бригадой на поиск места повреждения в распределительной сети без резервирования до 82 %, а в сети с резервированием – до 76 %.

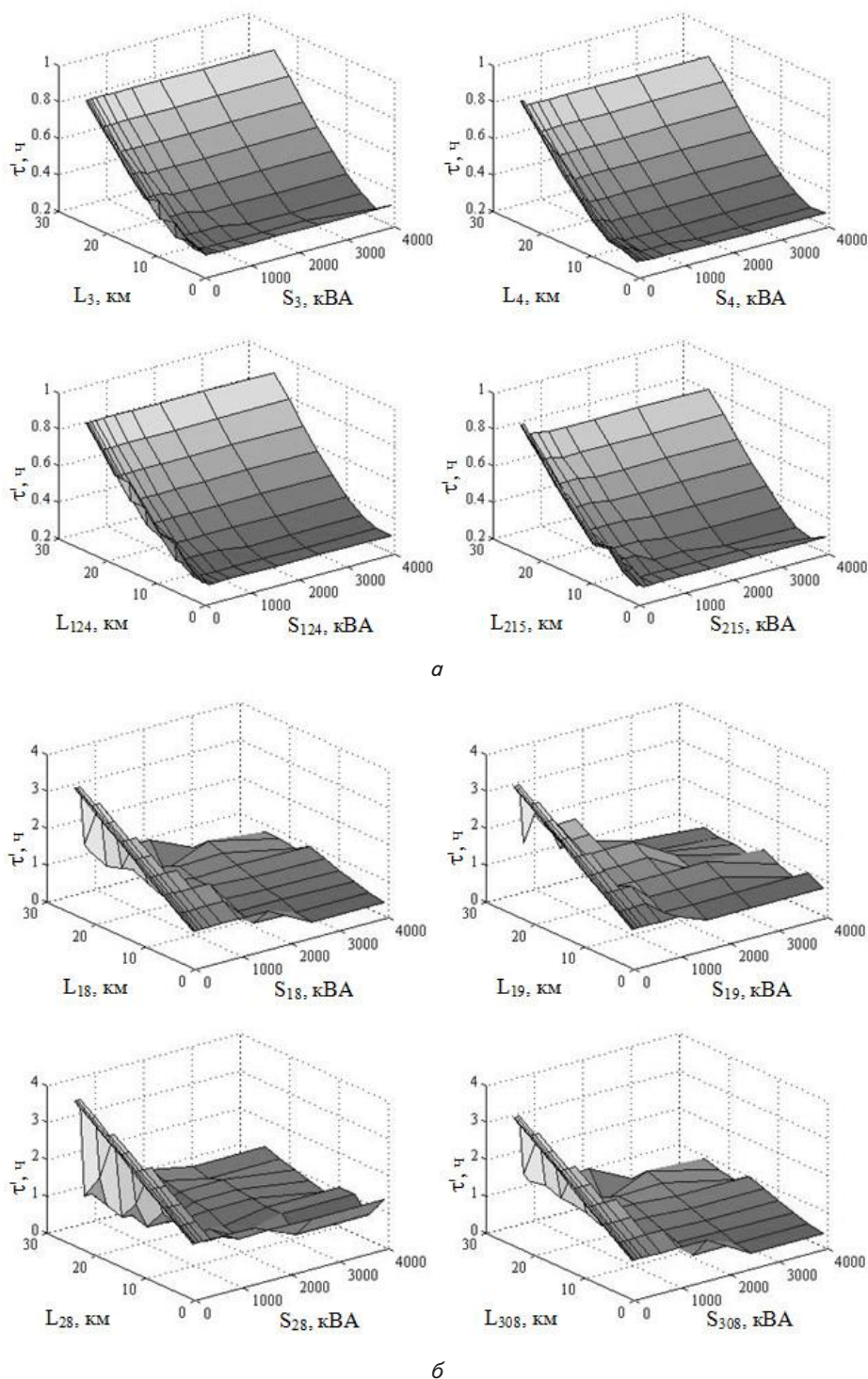


Рис. 6. Изменение величины среднего времени поиска в зависимости от сочетаний параметров ЛЭП: *а* – в нерезервируемой сети, *б* – в резервируемой сети

8. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Разработан алгоритм, позволяющий выбирать тип и место введения устройства при последовательной автоматизации разветвлённой распределительной сети, а также за счёт особенностей объекта моделирования уменьшать количество итераций, выполняемых при поиске оптимальной системы повышения надёжности по приоритетным для ЛПР критериям.

2. Показано, что в разветвлённых распределительных сетях 10 кВ без резервирования наиболее эффективным средством повышения надёжности является линейный разъединитель, установленный совместно с

указателем повреждённого участка, который может передавать информацию о месте повреждения на диспетчерский пункт. В резервируемых распределительных сетях 10 кВ, мощности электроустановок потребителей которых не превышают 250 кВА, установка дополнительных СПН, в том числе и самих АВР, не эффективна.

3. Показано, что установка оптимальной системы повышения надёжности позволит снизить ожидаемый ущерб от годового недоотпуска электрической энергии до 83 % в разветвлённой распределительной сети без резервирования и до 90 % – в сети с резервированием. При этом ожидаемое среднее время поиска места повреждения в распределительной сети без резервирования снизится до 82 %, а в сети с резервированием – до 76 %.

Литература

1. Шкура, В. П. Об аварийности в 2010 году и показатели надежности в электрических сетях 6–150 кВ энергоснабжающих компаний, которые входят в состав НАК «ЭКУ» [Текст] / В. П. Шкура // Электрические сети и системы. – 2011. – № 2. – С. 32–42.
2. Аржанникова, А. Е. Определение расстояния до места короткого замыкания в сетях 6–10 кВ [Текст] / А. Е. Аржанникова // Энергетик. – 1997. – № 12. – С. 22.
3. Pereira, C. E. M. Optimization algorithm for Fault Location in Transmission Lines Considering Current Transformer Saturation [Text] / C. E. M. Pereira, L. C. J. Zanetta // IEEE Transaction on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, Issue 2. – P. 603–608. doi: 10.1109/tpwrd.2004.838521
4. Izykowski, J. Accurate Noniterative Fault Location Algorithm Utilizing Two-End Unsynchronized Measurements [Text] / J. Izykowski, E. Rosolowski, P. Balcerek, M. Fulczyk, M. M. Saha // IEEE Transaction on Power Delivery. – 2010. – Vol. 25, Issue 1. – P. 72–80. – (Wroclaw Univ. of Technol., Wroclaw, Poland). doi: 10.1109/tpwrd.2009.2035222
5. Dong Xinzhou. Optimizing solution of fault location [Text] / Dong Xinzhou, Chen Zheng, He Xuanzhou, Wang Kehong, Luo Chengmu // Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE. – 2002. – Vol. 3. – P. 1113–1117. doi: 10.1109/pess.2002.1043442
6. Гриб, О. Г. Метод определения мест коротких замыканий на высоковольтных линиях электропередачи [Текст] / О. Г. Гриб, А. Д. Супрун, М. Ю. Платонова // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2009. – № 11. – С. 29–31.
7. Борухман, В. А. Установка указателей повреждённого участка линии 6–10 кВ типа УПУ-1 [Текст] / В. А. Борухман // Электрические станции. – 1979. – № 10. – С. 84.
8. Буйный, Р. А. Новые подходы к учету надежности электроснабжения потребителей в рыночных условиях [Текст] / Р. А. Буйный, А. В. Гай, А. Ю. Сорокин, В. В. Тисленко // Техническая электродинамика. – 2002. – № 5. – С. 85–88.
9. Буйный, Р. А. Метод зонных структур в оптимизации надежности распределительных сетей 10 кВ [Текст] / Р. А. Буйный, В. В. Зорин, В. В. Тисленко // Электрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – № 2. – С. 30–35.
10. You, H. Self-healing in power systems: an approach using islanding and rate of frequency decline-based load shedding [Text] / H. You, V. Vittal, Z. Yang // IEEE Transactions on Power Systems. – 2003. – Vol. 18. – P. 174–181. doi: 10.1109/tpwrs.2002.807111
11. Sclater, N. Handbook of electrical design details [Text] / N. Sclater, J. E. Traister. – New York : McGraw-Hill, 2000. – 451 p.
12. Сиротенко, М. О. Пошук оптимальної схеми розміщення індикаторних пристроїв в мережі 10 кВ [Текст] / М. О. Сиротенко // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології : матеріали III Всеукр. уаук.-практ. конф. молодих учених, студентів і аспірантів (АКІТ-2013). – К. : НУТУ «КПІ», 2013. – С. 16–17.
13. Тимчук, С. А. Нечёткая математическая модель расчёта недоотпуска электроэнергии в нерезервируемой разветвлённой электрической сети 10 кВ [Текст] / С. А. Тимчук, М. А. Сиротенко, А. В. Мирошник // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов : сб. тр. VII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Благовещенск: Амурского государственного университета, 2013. – С. 298–302.
14. Сиротенко, М. А. Вычислительная программа поиска оптимального количества и мест размещения средств повышения надёжности в распределительных электрических сетях 10 кВ [Текст] / М. А. Сиротенко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2013. – Вип. 142. – С. 62–63.