

УДК 621.316.11

Т. М. ХАЛИЛ СЕЛИМ – аспірант, інженер-електрик, Saudi Electricity Company, Саудовська Аравія, tamerml@yahoo.com

А. В. ГОРПИНИЧ – к.т.н., доцент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь, gorpinich@ieee.org

Т. Н. СЕРДЮК – к.т.н., доцент, Днепропетровский національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, serducheck-t@rambler.ru

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕСТ УСТАНОВКИ И МОЩНОСТИ БАТАРЕЙ
КОНДЕНСАТОРОВ С УЧЁТОМ ВЫСШИХ ГАРМОНИК И
ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ ВО ВРЕМЕНИ**

*Статья рекомендована к публикации д. т. н., проф. И. В. Жежеленко (Украина),
д.т.н., проф. А. М. Афанасовым (Украина)*

В настоящее время значительное количество электроэнергии (ЭЭ), вырабатываемой на электростанциях, теряется в процессе её передачи и распределения среди потребителей. Около 40 % от этих суммарных потерь приходится на потери в распределительных сетях (РС). Например, в 2006 г. суммарные потери ЭЭ в энергосистемах США составили 1638 млрд. кВт·ч, причём из них 655 млрд. кВт·ч составили потери именно в РС. Снижение этих потерь в РС всего лишь на скромные 10 % позволило бы сэкономить 65 млрд. кВт·ч ЭЭ, что в денежном эквиваленте равносильно экономии 5,7 млрд. \$, учитывая среднюю стоимость 1 кВт·ч ЭЭ в США в 2006 г. Такое количество сэкономленной ЭЭ превышает потребление Швейцарии с населением 7,5 млн. чел. в 2008 г. и соответствует выбросам в атмосферу 39 млн. метрических тонн углекислого газа от электростанций, работающих на угле [1].

По данным Министерства энергетики и угольной промышленности, в Украине потери ЭЭ в РС достигают 14 %, тогда как в развитых странах они не превышают 6–8 % (например, это почти вдвое выше, чем в странах Евросоюза). В денежном выражении такой высокий уровень потерь приводит к убыткам порядка 800 млн. долларов ежегодно. Следует отметить, что относи-

тельные потери ЭЭ в электрических сетях СССР по данным 1990 г. составляли около 8,5 % [2]. Формально в Украине существует «Энергетическая стратегия», рассчитанная на период до 2030 г., призванная повысить эффективность работы энергосистемы, которая среди прочего предполагает и снижение технологических потерь ЭЭ в электрических сетях до 6–7 %, однако для её реализации, например, только в развитие, реконструкцию и модернизацию РС необходимо инвестировать 134 млрд. грн.

Одним из наиболее эффективных методов снижения потерь ЭЭ в РС является оптимизация режимов по напряжению и реактивной мощности путём установки батарей конденсаторов (БК). В большинстве публикаций, в которых предлагаются различные методы оптимизации мест установки и мощности БК в радиальных РС, принимается допущение об отсутствии искажений синусоидальности кривой напряжения в узлах нагрузки и влияние высших гармоник (ВГ) не учитывается, а целевая функция составляется с учётом только потерь активной мощности, т.е. нагрузка принимается неизменной во времени [3–6]. Можно отметить лишь незначительное количество работ, в которых вопросам совместного учёта ВГ, потерь активной мощности и потерь ЭЭ при решении проблемы оптимизации мест

установки и мощности БК придаётся существенное значение [7–9]. Между тем хорошо известно, что БК оказывают значительное влияние на распространение ВГ в РС, а их подключение в узлах сети, кривая напряжения в которых в значительной мере искажена за счёт ВГ, может привести к возникновению параллельного резонанса (резонанса токов) на частотах ВГ и даже выходу БК из строя. Кроме того, в реальных РС с изменяющимися во времени нагрузками необходимо учитывать не только потери активной мощности, но и потери ЭЭ. В этом случае можно считать, что снижение потерь активной мощности приводит к снижению максимальной мощности, зарегистрированной измерительными приборами на протяжении всего года, а экономический эффект от снижения потерь активной мощности возникает за счёт отсрочки инвестиций в расширение сети, т.е. снижение потерь активной мощности приводит к снижению капитальных затрат на РС. С другой стороны, снижение потерь ЭЭ при разных дискретизированных уровнях нагрузки можно рассматривать как снижение эксплуатационных затрат. Таким образом, совместный учёт потерь активной мощности и потерь ЭЭ позволяет выполнить оценку суммарного экономического эффекта, возникающего как за счёт снижения капитальных, так и эксплуатационных затрат. В связи с этим достаточно актуальной теоретической и прикладной задачей является разработка усовершенствованных алгоритмов оптимизации, учитывающих не только изменение потерь активной мощности и потерь ЭЭ при компенсации реактивной мощности (КРМ), но и ограничения по параметрам напряжения в узлах нагрузки, нелинейную зависимость затрат на БК от их мощности, дискретность шкалы мощностей БК и узлов их подключения, радиальную топологию РС и т.д. Такие алгоритмы оптимизации чаще всего базируются на методах искусственного интеллекта: в последние годы активно применяют метод имитации отжига, искусственные нейронные сети,

генетические и эволюционные алгоритмы, алгоритм поиска с запретами, муравьиные алгоритмы и др., т.е. наблюдается повышенный интерес к методам, основанным на использовании математического описания сложных природных механизмов.

Цель работы – представить алгоритм оптимизации мест установки и мощности БК, учитывающий искажения синусоидальности кривой напряжения в узлах РС и изменения нагрузки во времени, который реализован с помощью селективного метода роя частиц (СМРЧ); показать эффективность СМРЧ путём сравнения с результатами оптимизации методом полного перебора (МПП).

Изменяющуюся во времени нагрузку можно представить в виде годового графика нагрузки по продолжительности – упорядоченной ступенчатой диаграммы постепенно убывающих ординат графика (значений нагрузок), начиная с максимальной величины нагрузки и заканчивая минимальной (рис. 1).

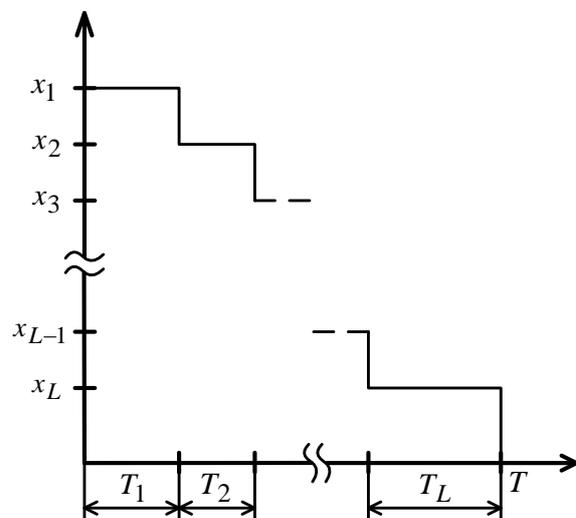


Рис. 1. Годовой график нагрузки по продолжительности

При этом в схеме m -узловой радиальной РС, показанной на рис. 2, нагрузку на шинах подстанции и нагрузки в узлах можно аппроксимировать с помощью L дискретизированных уровней, полагая, что все нагрузки в узлах изменяются во времени согласованно [7].

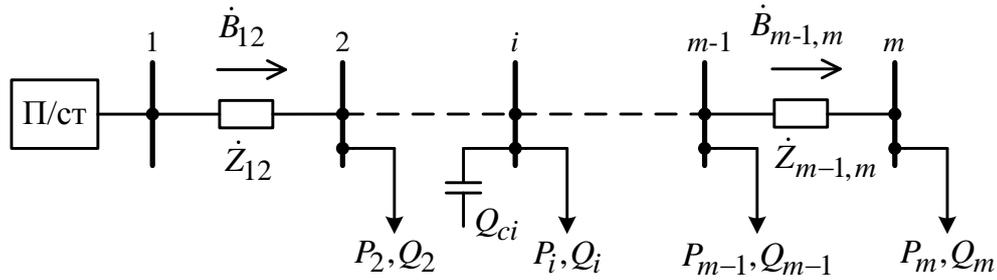


Рис. 2. m -узловая радиальная РС

Т.е. какой-либо уровень нагрузки l узла i может быть представлен в виде зависимости от максимальной нагрузки как $(P_{il}, Q_{il}) = x_l(P_{1l}, Q_{1l})$, где $x_l \leq 1$.

Для моделирования m -узловой радиальной РС, показанной на рис. 2, на основной частоте и частотах ВГ с учётом изменяющейся во времени нагрузки примем следующие допущения:

- 1) нагрузка симметричная;
- 2) ёмкости линий не учитываются;
- 3) все нагрузки являются линейными и неизменными во времени;
- 4) ВГ в РС возникают за счёт искажённой кривой напряжения на шинах подстанции.

Для определения оптимального потоко-распределения в РС с учётом токов и напряжений ВГ можно использовать метод на основе матрицы полных проводимостей [10-12]. Этапы моделирования при этом будут следующие:

- 1) расчёт среднеквадратических значений и фаз напряжений в узлах РС на основной частоте;
- 2) расчёт инжекционных токов основной частоты, инжекционных токов ВГ, полных проводимостей нагрузок, БК и линий на частотах ВГ с помощью уравнений (1)-(5), соответственно;
- 3) расчёт напряжений ВГ, обусловленных наличием нелинейных нагрузок, в соответствии с уравнением (6);
- 4) расчёт среднеквадратических значений напряжений и значений коэффициентов искажения синусоидальности кривой

напряжения в узлах РС в соответствии с уравнениями (8) и (9).

$$\dot{I}_{il} = \frac{P_{il} - jQ_{il}}{U_{il}^*}, \quad (1)$$

$$\dot{I}_{hil} = \frac{w_i \dot{I}_{il}}{h}, \quad (2)$$

где P_{il} и Q_{il} – активная и реактивная нагрузки в узле i при уровне нагрузки l , соответственно; \dot{I}_{il} и U_{il}^* – инжекционный ток и сопряжённая величина напряжения основной частоты в узле i при уровне нагрузки l , соответственно; \dot{I}_{hil} – инжекционный ток h -й гармоники при уровне нагрузки l ; w_i – нелинейная часть нагрузки в узле i .

Если пренебречь поверхностным эффектом и эффектом близости

$$\dot{y}_{load\ hil} = (1 - w_i) \left(\frac{P_{il}}{|U_{il}|^2} - j \frac{Q_{il}}{h|U_{il}|^2} \right), \quad (3)$$

$$\dot{y}_{ch} = h \dot{y}_{c1}, \quad (4)$$

$$\dot{y}_{hi, i+1} = (R_{i, i+1} + jhX_{i, i+1})^{-1}, \quad (5)$$

где $\dot{y}_{load\ hil}$ – полная проводимость нагрузки при уровне l , полная проводимость БК и полная проводимость линии между узлами i и $i+1$ на частоте h -й гармоники, соответственно; $R_{i, i+1}$ и $X_{i, i+1}$ – активное и индуктивное сопротивление линии между узлами i и $i+1$, соответственно.

Напряжения ВГ, обусловленные наличием нелинейных нагрузок:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1hl} \\ \dot{U}_{2hl} \\ \vdots \\ \dot{U}_{m-1hl} \\ \dot{U}_{mhl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11hl} & \dot{Y}_{12hl} & 0 & \cdots & 0 \\ \dot{Y}_{21hl} & \dot{Y}_{22hl} & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \vdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \vdots & \dot{Y}_{m-1, m-1 hl} & \dot{Y}_{m-1, m hl} \\ 0 & \cdots & 0 & \dot{Y}_{m, m-1 hl} & \dot{Y}_{m, m hl} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1hl} \\ \dot{I}_{2hl} \\ \vdots \\ \dot{I}_{m-1hl} \\ \dot{I}_{mhl} \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\dot{Y}_{ijhl} = \begin{cases} -\dot{y}_{ijh}, & \text{если } j \neq i \\ \dot{y}_{hi, i-1} + \dot{y}_{hi, i+1} + \dot{y}_{load hil} + \\ + (cs_{fjl} + cs_{sjl})\dot{y}_{ch}, & \text{если } j = i \in S_c \end{cases}, \quad (7)$$

где cs_{fjl} и cs_{sjl} – количество типоразмеров БК фиксированной мощности и со ступенчатым регулированием, устанавливаемых в узле j при уровне нагрузки l , соответственно; S_c – количество узлов, в которых предполагается установка БК.

Среднеквадратическое значение напряжения в узле i при уровне нагрузки l

$$|U_{il}| = \sqrt{\sum_{h=1}^H |U_{hil}|^2}, \quad (8)$$

где U_{hil} – напряжение h -й гармоники при уровне нагрузки l ; H – номер последней из учитываемых гармоник.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в узле i при уровне нагрузки l или суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению (total harmonic distortion)

$$THD_{il}(\%) = \frac{100}{|U_{il}|} \sqrt{\sum_{h \neq 1}^H |U_{hil}|^2}, \quad (9)$$

Целевую функцию при оптимизации мест установки и мощности БК с учётом ВГ и изменяющейся во времени нагрузки можно сформулировать следующим образом: при разных уровнях нагрузки необходимо найти такое оптимальное сочетание между количеством типоразмеров БК фиксированной мощности и со ступенчатым регулированием (нерегулируемых и регулируемых) и такие оптимальные узлы их

подключения, чтобы чистые сбережения от снижения потерь активной мощности и потерь ЭЭ были максимальными, учитывая при этом эксплуатационные ограничения в виде равенств и неравенств, накладываемые на предельно допустимые уровни напряжений, коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения в узлах и максимально допустимое количество устанавливаемых БК [7]. В этом случае чистые сбережения составят:

$$S = K^{\Pi} (P_1 - P_1^{\text{бк}}) + K^{\Theta} \sum_{l=1}^L (\Delta \mathcal{E}_l - \Delta \mathcal{E}_l^{\text{бк}}) - K^{\text{бк}} \quad ; \quad (10)$$

$$\Delta P_l = \sum_{h=1}^H \left(\sum_{i=0}^{m-1} \Delta P_{hi, i+1l} \right) \quad ; \quad (11)$$

$$\Delta P_{hi, i+1l} = R_{i, i+1l} \left[|U_{hi+1l} - U_{hil}| |y_{hi, i+1l}| \right]^2; \quad (12)$$

$$\Delta P_l = \sum_{h=1}^H \left(\sum_{i=0}^{m-1} R_{i, i+1l} \left[|U_{hi+1l} - U_{hil}| |y_{hi, i+1l}| \right]^2 \right); \quad (13)$$

$$\Delta \mathcal{E}_l = \Delta P_l T_l; \quad (14)$$

$$K^{\text{бк}} = \sum_{j \in S_c} (k_f^{\text{бк}} cs_{fjl} + k_s^{\text{бк}} cs_{sj}^*) \quad ; \quad (15)$$

$$cs_{sj}^* = \max \{ cs_{sjl}, l = L-1, L-2, \dots, 2, 1 \}; \quad (16)$$

$$cs_{fjL} + cs_{sjL} \leq cs; \quad (17)$$

$$\sum_{j \in S_c} (cs_{fjL} + cs_{sjL}) \leq Cs \quad ; \quad (18)$$

$$U_{\min} \leq |U_{il}| \leq U_{\max}; \quad (19)$$

$$THD_{il}(\%) \leq THD_{\max}, \quad (20)$$

где S – чистые сбережения, \$; P_1 и $P_1^{\text{БК}}$ – максимальные мощности до установки БК и после установки БК, соответственно (рассчитываются при уровне нагрузки $l=1$), кВт; $\Delta \mathcal{E}_l$ и $\Delta \mathcal{E}_l^{\text{БК}}$ – суммарные потери ЭЭ в РС при уровне нагрузки l до установки БК и после установки БК, соответственно, кВт·ч; ΔP_l – суммарные потери активной мощности в РС при уровне нагрузки l с учётом ВГ, кВт; ΔP_1 – суммарные потери активной мощности в РС в режиме максимальных нагрузок с учётом ВГ, кВт; L – количество уровней нагрузки; T_l – продолжительность уровня нагрузки l , ч; K^3 – эквивалентная ежегодная стоимость потерь ЭЭ, \$/кВт·ч; $K^{\text{БК}}$ – ежегодные затраты на БК, \$; $k_f^{\text{БК}}$ и $k_s^{\text{БК}}$ – ежегодные затраты на БК фиксированной мощности и со ступенчатым регулированием, соответственно, \$; cs и Cs – максимально допустимое коли-

чество БК, устанавливаемых в узле j и во всей РС, соответственно.

В качестве примера рассмотрим реальную 9-узловую тестовую схему IEEE [13], в которой с помощью СМРЧ [14] выполним оптимизацию мест установки и мощности нерегулируемых и регулируемых БК, и сравним полученные результаты с результатами оптимизации этой схемы методом полного перебора [7]. Схема имеет вид, показанный на рис. 2; информация о нагрузках и данные по участкам линий приведены в табл. 1 и 2, напряжения на шинах подстанции и продолжительность нагрузки при разных уровнях – в табл. 3. Номинальная мощность трансформатора, установленного на подстанции, равна 15 МВА, номинальное напряжение РС – 23 кВ, уровни 5-й и 7-й гармоник напряжения на шинах подстанции составляют 4 % и 3 %, соответственно (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения равен $THD = 5\%$). При оптимизации будем считать, что мощности всех устанавливаемых БК пропорциональны одному стандартному значению 300 квар. Значения других параметров, используемых при моделировании, приведены в табл. 4, а результаты оптимизации – в табл. 5.

Таблица 1

Информация о нагрузках

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P , кВт	1840	980	1790	1598	1610	780	1150	980	1640
Q , квар	460	340	446	1840	600	110	60	130	200

Таблица 2

Данные по участкам линий

От узла	0	1	2	3	4	5	6	7	8
К узлу	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R , Ом	0,1233	0,014	0,7463	0,6984	1,9831	0,9053	2,0552	4,7953	5,3434
X , Ом	0,4127	0,6051	1,205	0,6084	1,7276	0,7886	1,164	2,716	3,0264

Таблица 3

Напряжения на шинах подстанции и продолжительность нагрузки при разных уровнях

Уровень нагрузки l	Продолжительность уровня нагрузки T_l , ч	x_l	U_{0l} , о.е.
1	1314	1,0	1,050
2	4818	0,7	1,025
3	2628	0,4	1,000

Таблица 4

Параметры, используемые при моделировании девятиузловой тестовой схемы IEEE

Наименование	w_i , %	S_c	$K^П$, \$/кВт	$K^Э$, \$/кВт·ч	$k_f^{БК}$, \$/год
Значения	15	{3, 4, 5, 7, 9}	120	0,05	100
Наименование	$k_s^{БК}$, \$/год	$Q_j^{БК}$, квар	cs	Cs	H
Значения	100	300	10	28	13
Наименование	U_{min} , о.е.	U_{max} , о.е.	THD_{max} , %	–	–
Значения	0,95	1,05	5	–	–

Таблица 5

Оптимальное количество БК мощностью 300 квар при разных уровнях нагрузки, полученное с помощью МПП и СМРЧ

Метод оптимизации		МПП			СМРЧ		
Уровень нагрузки l		1*	2*	3#	1*	2*	3#
Узлы S_c , в которых предполагается установка БК без учёта ограничений по параметрам напряжения	3	7	3	1	6	3	2
	4	5	3	2	5	3	2
	5	2	1	1	2	1	1
	7	0	0	1	1	0	0
	9	1	1	0	0	0	1
Узлы S_c , в которых предполагается установка БК с учётом ограничений по параметрам напряжения	3	5	3	1	5	3	2
	4	4	3	2	5	2	2
	5	2	1	1	3	1	1
	7	2	1	0	0	0	1
	9	1	0	1	2	1	0

Примечания: * – БК со ступенчатым регулированием, # – БК фиксированной мощности

На основании результатов моделирования можно сделать следующие выводы.

1. До оптимизации ежегодная стоимость потерь активной мощности и потерь ЭЭ составляла 252873,5 \$; при разных уровнях

нагрузки максимальное значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения не превышало установленного предела $THD_{max} = 5\%$, а минимальное среднеквадратическое значение напряжения

составляло $U_{i\min} = 0,872$ о.е., что, наоборот, не соответствовало установленному пределу $U_{\min} = 0,95$ о.е.

2. После оптимизации, если не учитывать ограничения по параметрам напряжения, чистые сбережения от снижения потерь активной мощности и потерь ЭЭ при оптимизации с помощью МПП составили 13,77 % (в % от ежегодной стоимости потерь активной мощности и потерь ЭЭ до оптимизации), при оптимизации с помощью СМРЧ – 13,81 %. Следует отметить, что несмотря на практически одинаковый получаемый с помощью обоих методов экономический эффект, распределение по количеству БК мощностью 300 квар при разных уровнях нагрузки между узлами 3, 4, 5, 7 и 9 разное для двух методов. Кроме того, рассматриваемый числовой пример доказывает, что СМРЧ обладает хорошей сходимостью, высокой точностью и эффективностью.

3. Если же учитывать ограничения по параметрам напряжения, то после оптимизации чистые сбережения от снижения потерь активной мощности и потерь ЭЭ при использовании МПП составили 13,45 %, а при использовании СМРЧ – 13,53 %. Такое незначительное расхождение между чистыми сбережениями, полученными после оптимизации с учётом и без учёта ограничений по параметрам напряжения, объясняется тем, что доля нелинейной нагрузки в полученной до оптимизации ежегодной стоимости потерь активной мощности и потерь ЭЭ (252873,5 \$) составляет всего 0,3 % [7].

4. Чтобы оценить разницу между количеством БК, устанавливаемых в узлах 3, 4, 5, 7 и 9 при наличии нелинейной нагрузки и при её отсутствии, необходимо ещё дополнительно провести оптимизацию при допущении о том, что вся нагрузка на 100 % является линейной, т.е. принять $w_i = 0$ [7].

Библиографический список

1. Feng, X. Smarter grids are more efficient: voltage and var optimization reduces energy losses and peak demands [Text] / X. Feng, W. Peterson, F. Yang, G. M. Wickramasekara, J. Finney // *ABB Review*. – 2009. – Vol. 3. – P. 33-37.
2. Халил, Т. М. Выбор оптимальных сечений проводников и мест установки и мощности батарей конденсаторов в радиальных распределительных сетях с помощью селективного метода роя частиц [Текст] / Т. М. Халил, А. В. Горпинич // *Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету*. – 2011. – Вип. 11 (186). – С. 406-413.
3. Baran, M. E. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system [Text] / M. E. Baran, F. F. Wu // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1989. – Vol. 4. – No. 1. – P. 735-743.
4. Huang, Y.-C. Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using tabu search approach [Text] / Y.-C. Huang, H.-T. Yang, C.-L. Huang // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 1996. – Vol. 11. – No. 4. – P. 1868-1873.
5. Mekhamer, S. F. Application of fuzzy logic for reactive-power compensation of radial distribution feeders [Text] / S. F. Mekhamer, S. A. Soliman, M. A. Moustafa, M. E. El-Hawary // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2003. – Vol. 18. – No. 1. – P. 206-213.
6. Damodar, Reddy M. Capacitor placement using fuzzy and particle swarm optimization method for maximum annual savings [Text] / M. Damodar Reddy, V. C. Veera Reddy // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2008. – Vol. 3. – No. 3. – P. 25-30.
7. Baghzouz, Y. Effects of nonlinear loads on optimal capacitor placement in radial feeders [Text] / Y. Baghzouz // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1991. – Vol. 6. – No. 1. – P. 245-251.
8. Khalil, T. M. Optimal capacitor placement on radial distribution feeders in presence of nonlinear loads using binary particle

- swarm optimization [Text] / T. M. Khalil, H. K. M. Youssef, M. M. Abdel Aziz // Proc. 19th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2007). – 21-24 May 2007. – Session 5. – Paper no. 180. – Vienna (Austria), 2007. – P. 1-4.
9. Khalil, Selim T. M. Economical optimization of capacitor placement for large-scale practical distorted distribution network [Text] / T. M. Khalil Selim, A. V. Gorpnich // Electrical Power Quality and Utilization Journal. – 2013. – Vol. 16. – No. 2. – P. 21-29.
 10. Baghzouz, Y. Shunt capacitor sizing for radial distribution feeders with distorted substation voltages [Text] / Y. Baghzouz, S. Ertem // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1990. – Vol. 5. – No. 2. – P. 650-657.
 11. Teng, J.-H. Backward/forward sweep-based harmonic analysis method for distribution systems [Text] / J.-H. Teng, C.-Y. Chang // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22. – No. 3. – P. 1665-1672.
 12. Teng, J.-H. A direct approach for distribution system load flow solutions [Text] / J.-H. Teng // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – Vol. 18. – No. 3. – P. 882-887.
 13. Grainger, J. J. Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders [Text] / J. J. Grainger, S. H. Lee // IEEE Transac-

- tions on Power Apparatus and Systems. – 1981. – Vol. 100. – No. 3. – P. 1105-1118.
14. Khalil, T. M. Selective particle swarm optimization [Text] / T. M. Khalil, A. V. Gorpnich // International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering (IJMSE). – 2012. – Vol. 3. – No. 4. – P. 1-4.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, вищі гармоніки, батареї конденсаторів, багатокритеріальна частково цілочислова комбінаторна нелінійна оптимізація, селективний метод рою частинок, зменшення втрат активної потужності та втрат електроенергії.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, высшие гармоники, батареи конденсаторов, многокритериальная частично целочисленная комбинаторная нелинейная оптимизация, селективный метод роя частиц, снижение потерь активной мощности и потерь электроэнергии.

Keywords: electromagnetic compatibility, harmonics, capacitor banks, multi-objective mixed-integer combinatorial nonlinear optimization, selective particle swarm optimization, active power losses and electric losses reduction.

Поступила в редколлегию 28.09.2014

Принята к печати 10.10.2014