

5. Бурбело М. Й. Застосування багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг в електричних мережах / М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький, О. В. Бабенко, О. В. Салій // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 6. – С. 76 – 79.

Piotr Pleshkov, Vasiliy Zinzura

Kirovograd National Technical University

Development and experimental research of the microprocessor control system of on-load tap changer of power transformer

For modern power supply systems, particularly topical issue of improving the quality of electrical energy. Existing methods and technical means of reducing the levels of quality of electric energy in electric networks though are quite effective, but require significant capital investments, which hinders their widespread use. One way to solve this problem - it is an improvement of automatic control systems of technical means of voltage regulation. Article is devoted to the development of the algorithm of the control unit device-load power transformer winding connection with the scheme "D/Y to zero," the development of schematic diagrams of the control unit and the experimental stand, the development model of the device. An experimental study on the quality of the system of automatic voltage regulation. Results of experimental studies have shown that the application of the proposed device voltage regulation decrease levels of quality of electric energy (steady voltage deviation, coefficient of voltage unbalance on the negative and zero sequence) to values that do not exceed the normal allowable.

multicriteria optimization, contactless OLTC

Одержано 28.04.14

УДК 620.4+658.22

П.Г.Плешков, доц., канд. техн. наук, Ю.И.Казанцев, доц., канд. техн. наук, Р.В.Телюта, канд. техн. наук

Кировоградский национальный технический университет

Оптимизация размещения компенсирующих устройств в системе электроснабжения промышленного предприятия методом неопределённых множителей Лагранжа

В статье рассматривается оптимизационная задача как основа рационального использования электрической энергии.

компенсирующие устройства, расход электрической энергии, стохастические характеристики, методы оптимизации

П.Г.Плешков, доц., канд.техн.наук, Ю.И.Казанцев, доц.,канд.техн.наук, Р.В.Телюта, канд.техн.наук

Кіровоградський національний технічний університет

Оптимізація розміщення компенсуючих пристроїв в системі електропостачання промислового підприємства методом невизначених множників Лагранжа

У статті розглядається оптимізаційне завдання як основа раціонального використання електричної енергії.

компенсуючі пристрої, витрата електричної енергії, стохастичні характеристики, методи оптимізації

© П.Г.Плешков, Ю.И.Казанцев, Р.В.Телюта, 2014

Для создания экономичного режима электропотребления необходимо наряду с другими мероприятиями [5], также решить вопрос оптимального размещения компенсирующих устройств (КУ) в системе электроснабжения промышленных предприятий.

Постановка задачи. В общей постановке эта задача с учётом ограничений сводится к нахождению такого вектора переменных мощности КУ, который доставляет минимум функции цели, отражающей критерий качества рассматриваемой системы.

Если в качестве функции цели использовать готовые расчётные затраты на оборудование КУ и оплату потерь электроэнергии, связанную с передачей реактивной мощности (РМ) к месту потребления, то задаче оптимального размещения КУ будет представлять собой задачу нелинейного программирования.

Анализ публикаций. Рассмотрены вопросы оптимизации [1,6], компенсации реактивной мощности при статическом задании нагрузок [2], нелинейности между мощностью и током в узлах [3], методы решения некорректных задач [4].

Цель статьи. Экономия электрической энергии в системе электроснабжения предприятия за счёт оптимального размещения компенсирующих устройств методом неопределённых множителей Лагранжа.

Основная часть. Расчётные затраты Z являются интегральной характеристикой работы сети, поэтому нагрузку в узлах целесообразно задавать её статистическими характеристиками: математическим ожиданием $M(\dot{S})$ и матрицей корреляционных моментов K_{sij} .

В [2] показано, что мощность нерегулируемых КУ определяется только одним статистическим показателем – математическим ожиданием реактивной нагрузки.

Таким образом, необходимо найти значение аргументов при которых доставляется минимум функции расчётных затрат вида:

$$Z = \sum_1^n Q_{ki} K_{ki} (p_n + p_a) + \sum_1^n Q_{ki} \Delta P_{ki} T C_{\Sigma} + M(\Delta P_{\Sigma}) T C_{\Sigma}. \quad (1)$$

где Q_{ki} – мощность КУ, установленных в i -м узле, кВар;

K_{ki} – удельные капитальные вложения, связанные с установкой КУ в i -м узле;

p_n – нормативный коэффициент амортизационных отчислений;

p_a – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

ΔP_{ki} – удельные потери активной мощности в конденсаторах i -го узла, кВт/кВар;

T – время включения конденсаторов, час;

C_{Σ} – стоимость потерь электрической энергии, грн;

$M(\Delta P_{\Sigma})$ – математическое ожидание потерь активной мощности, кВт.

С учётом [2] функция (1) может быть преобразована к виду:

$$Z = \sum_1^n Q_{ki} K_{ki} (p_n + p_a) + \sum_1^n Q_{ki} \Delta P_{ki} T C_{\Sigma} + \frac{\sum_i^n \sum_j^n [M P_i \cdot M P_j + (M Q_i - Q_{ki})(M Q_j - Q_{kj})]}{U^2} R_{ij} T C_{\Sigma}. \quad (2)$$

где $M P_i, M Q_i$ – математическое ожидание активной и реактивной нагрузок i -го узла;

R_{ij} - i -ий, j -ий елемент матриці власних і взаємних опорів;

Таким образом, необходимо отыскать минимум функции вида (2) в области независимых переменных, определяемой равенством вида:

$$\sum_1^n Q_{ki} = \sum_1^n Q_{\text{ку}\Sigma} \text{ при } Q_{ki} \geq 0,$$

где $Q_{\text{ку}\Sigma}$ – общая мощность КУ подлежащая установке.

В таком виде задача может быть решена методом неопределённых множителей Лагранжа.

Для этого формируется новая целевая функция Лагранжа вида:

$$F = Z - \lambda Q_{\text{ку}\Sigma}. \quad (3)$$

или, учитывая (2) имеем

$$F = \sum_1^n Q_{ki} K_{ki} (p_u + p_a) + \sum_1^n Q_{ki} \Delta P_{ki} TЦ_{\text{э}} + \frac{\sum_i^n \sum_j^n [MP_i \cdot MP_j + (MQ_i - Q_{ki})(MQ_j - Q_{kj})]}{U^2} R_{ij} TЦ_{\text{э}} - \lambda \sum_i^n Q_{ki}. \quad (4)$$

Необходимым условием существования экстремума функции Лагранжа является равенство нулю её частных производных:

$$\frac{dF}{dQ_{ki}} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

Частные производные от функции (2) имеют вид:

$$\frac{dZ}{dQ_{ki}} = K_{ki} (p_u + p_a) + \Delta P_{ki} TЦ_{\text{э}} - \frac{2TЦ_{\text{э}}}{U^2} \sum_{j=1}^n (MQ_j - Q_{kj}) R_{ij}. \quad (6)$$

В тоже время частные производные от функции вида (3) имеет вид:

$$\frac{dF}{dQ_{ki}} = \frac{dZ}{dQ_{ki}} - \lambda. \quad (7)$$

Учитывая условия (5) и выражение (3) функция (2) достигает экстремального значения (минимума) в области допустимых значений аргумента (6), если одновременно выполняются условия:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d3}{dQ_{ki}} &= \frac{d3}{dQ_{ki+1}} \\ \frac{d3}{dQ_{ki+1}} &= \frac{d3}{dQ_{ki+2}} \\ &\dots \\ \frac{d3}{dQ_{kn-1}} &= \frac{d3}{dQ_{kn}} \\ Q_{k1} + Q_{k2} + \dots + Q_{kn} &= Q_{ky\Sigma} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Принимая во внимание (6) систему (8) можно переписать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} K_{ki}(p_n + p_a) + \Delta P_{ki} TЦ_{\circ} - \frac{2TЦ_{\circ}}{U^2} \sum_{j=1}^n (MQ_j - Q_{kj}) R_{ij} &= \\ = K_{ki+1}(p_n + p_a) + \Delta P_{ki} TЦ_{\circ} - \frac{2TЦ_{\circ}}{U^2} \sum_{j=1}^n (MQ_j - Q_{kj}) R_{i+1,j} & \\ \dots & \\ K_{kn-1}(p_n + p_a) + \Delta P_{ki-1} TЦ_{\circ} - \frac{2TЦ_{\circ}}{U^2} \sum_{j=1}^n (MQ_j - Q_{ki}) R_{n-1,j} &= \\ K_{kn}(p_n + p_a) + \Delta P_{kn} TЦ_{\circ} - \frac{2TЦ_{\circ}}{U^2} \sum_{j=1}^n (MQ_j - Q_{kj}) R_{n,j} & \\ Q_{k1} + Q_{k2} + \dots + Q_{kn} &= Q_{ky\Sigma} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Решая (9) относительно независимых переменных получаем исходную систему уравнений (10).

$$\left. \begin{aligned} 2TЦ_{\circ} \left(\frac{R_n}{U^2} - \frac{R_{21}}{U^2} \right) Q_{k1} + 2TЦ_{\circ} \left(\frac{R_{12}}{U^2} - \frac{R_{22}}{U^2} \right) Q_{k2} + \dots + 2TЦ_{\circ} \left(\frac{R_{1n}}{U^2} - \frac{R_{2n}}{U^2} \right) Q_{kn} &= \\ = 2TЦ_{\circ} \sum_{j=1}^n \left(\frac{R_{ij}}{U^2} - \frac{R_{2j}}{U^2} \right) + (p_n + p_a)(K_{k2} - K_{k1}) + TЦ_{\circ} (\Delta P_{k2} - \Delta P_{k1}) & \\ \dots & \\ 2TЦ_{\circ} \left(\frac{R_{n-1,1}}{U^2} - \frac{R_{n,1}}{U^2} \right) Q_{k1} + 2TЦ_{\circ} \left(\frac{R_{n-1,2}}{U^2} - \frac{R_{n,2}}{U^2} \right) Q_{k2} + \dots + 2TЦ_{\circ} \left(\frac{R_{n-1,n}}{U^2} - \frac{R_{n,n}}{U^2} \right) Q_{kn} &= \\ = 2TЦ_{\circ} \sum_{j=1}^n \left(\frac{R_{n-1,j}}{U^2} - \frac{R_{n,j}}{U^2} \right) + (p_n + p_a)(K_{kn} - K_{k,n-1}) + TЦ_{\circ} (\Delta P_{k,n} - \Delta P_{k,n-1}) & \\ Q_{k1} + Q_{k2} + \dots + Q_{kn} &= Q_{ky\Sigma} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Если для некоторых переменных решение системы даёт отрицательные значения, то в этих узлах мощность устанавливаемых КУ приравнивается нулю, и данные точки в дальнейшем не рассматриваются как точки, в которых могут устанавливаться КУ. В этом случае исходная система (10) формируется вновь в соответствии с номерами узлов оставшихся в рассмотрении.

В (3) показано, что для более точного определения математических ожиданий и

дисперсій токов элементов сети, нагрузку необходимо задавать не математическим ожиданием мощности, а некоторой отличной на S_0 от неё величиной (добавкой).

В выражении (2) третий член связан с потерями электроэнергии, поэтому вместо $M(Q)$ - математическим ожиданием реактивной нагрузки, необходимо вести расчёт по величине

$$\mu Q = MQ + S_{0Q},$$

где S_{0Q} – величина добавки по реактивной мощности;

MQ – расчётные значения реактивной нагрузки.

Таким образом при решении системы вида (10) вместо MQ необходимо вводить расчётное значение μQ . Следует заметить, что определение μQ связано с расчётом режима сети и производится по алгоритму, изложенному в (3).

Алгоритм расчёта.

1. Расчёт нормального режима сети известными методами при статическом задании нагрузок.

2. Определение величины добавки S_0 по формуле

$$\dot{S}_{0i} = \hat{m}_{zxi} \dot{D} \dot{I}_i \quad (11)$$

где \dot{S}_{0i} – расчётное значение добавки к комплексу математического ожидания полной мощности в i -ом узле;

m_{zxi} – комплекс математического ожидания эффективного сопротивления в i -ом узле;

$\dot{D} \dot{I}_i$ – дисперсия полного тока в i -ом узле.

$$\dot{D} \dot{I}_i = \dot{D} \dot{I}_{pi} + \dot{D} \dot{I}_{ai}, \quad (12)$$

где $\dot{D} \dot{I}_{pi} + \dot{D} \dot{I}_{ai}$ – соответственно дисперсии реактивного и активного токов i -го узла.

Дисперсии реактивного и активного токов, полученные с помощью линеаризации нелинейной связи (3) вида:

$$\dot{I} = \frac{\dot{S}}{\hat{U}},$$

вычисляются по следующим формулам:

$$\dot{D} \dot{I}_{ai} = \frac{\dot{D} P_i}{(U_0 - 2m_{Ri} m_{lai})^2}, \quad (13)$$

$$\dot{D} \dot{I}_{pi} = \frac{\dot{D} Q_i + 4m_{xi}^2 m_{lai}^2 \dot{D} \dot{I}_{ai} + 4m_{xi} m_{lai} K_{Qlai} \sqrt{\dot{D} Q_i \dot{D} \dot{I}_{ai}}}{(U_0 - 2m_{xi} m_{lpi})}, \quad (14)$$

где $\dot{D} Q_i$ – дисперсия реактивной мощности i -го узла;

m_{xi} – математическое ожидания реактивной составляющей эффективного сопротивления в i -го узла;

m_{lxi} – математическое ожидания реактивного тока в i -ом узле;

$K_{Q_{lai}}$ – коэффициент корреляции между реактивной нагрузкой и активной ток
в i -ом узле;

$U_{\bar{o}}$ – напряжение балансного пункта;

$m_{I_{pi}}$ – математическое ожидания реактивного тока в i -ом узле;

m_{R_i} – математическое ожидания активной составляющей эффективного
сопротивления в i -го узла

В качестве критерия окончания вычислений использовалось сравнение по расчётным значениям μP и μQ мощностей, полученных на различных итерациях по условию

$$|\mu Q_{j-1} - \mu Q_j| < \varepsilon_1, \quad (15)$$

$$|\mu P_{j-1} - \mu P_j| < \varepsilon_2, \quad (16)$$

где

$$\mu Q_j = MQ_j + S_{\sigma Q_j},$$

$$\mu P_j = MP_j + S_{\sigma P_j}.$$

j – номер итерации.

3. Определение коэффициентов линейных алгебраических уравнений типа (10) и решение этой системы методом Гаусса.

4. Сравнение полученного решения системы с областью допустимых значений по условию

$$Q_{ki} > 0.$$

В тех узлах, где не выполняются данные условия все переменные фиксируются на нулевом уровне и исключаются из области рассматриваемых точек. Система (10) формируется заново и расчёт возвращается к пункту 3 алгоритма. В противном случае полученное решение принимается за окончательное.

5. В соответствии с расставленной компенсирующей мощностью производится расчёт режима и определяются потери энергии в сети. Производится расчёт приведённых затрат и их составляющих.

С учётом изложенного рассматриваются следующие варианты.

I вариант

Определение расчётных затрат на компенсацию реактивной мощности при существующем распределении компенсирующих устройств.

II вариант

Оптимальное распределение существующего набора компенсирующих устройств.

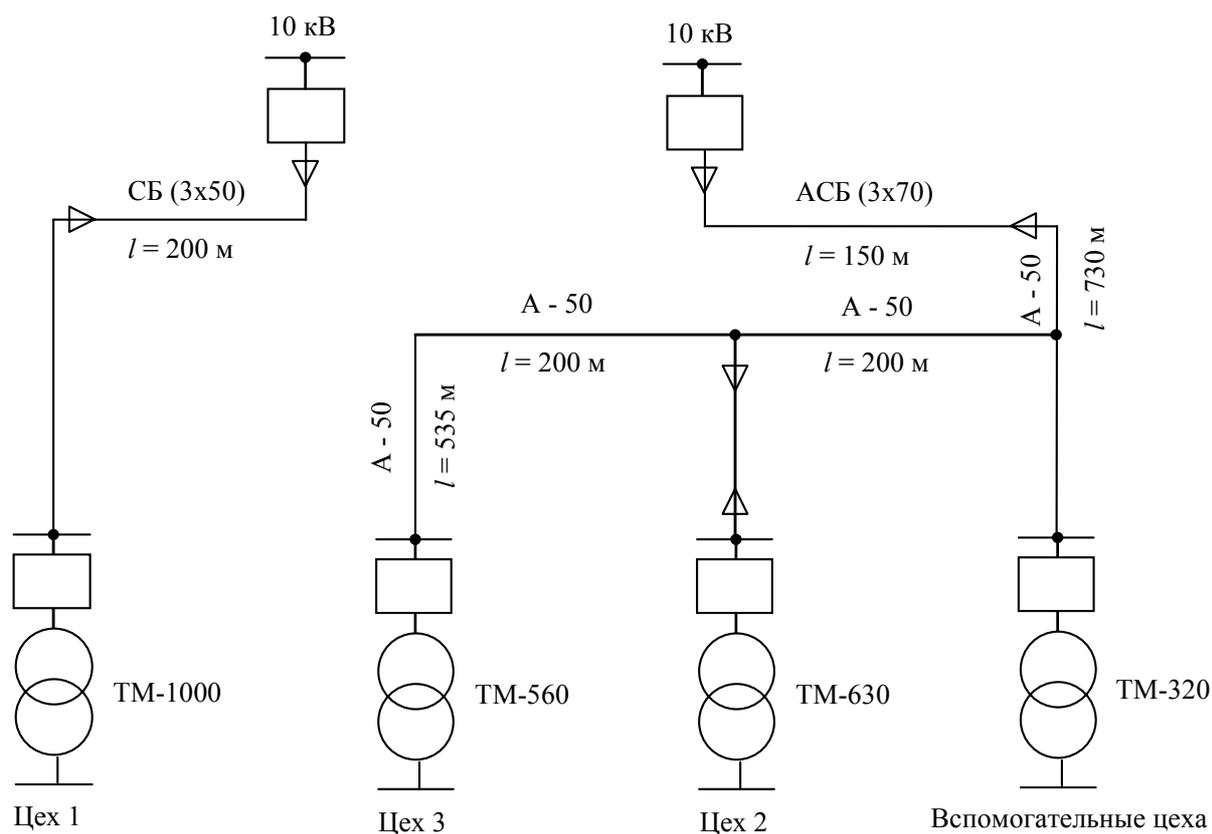
Для всех указанных вариантов принимались следующие значения расчётных величин:

$N = 10$ – количество рассматриваемых узлов;

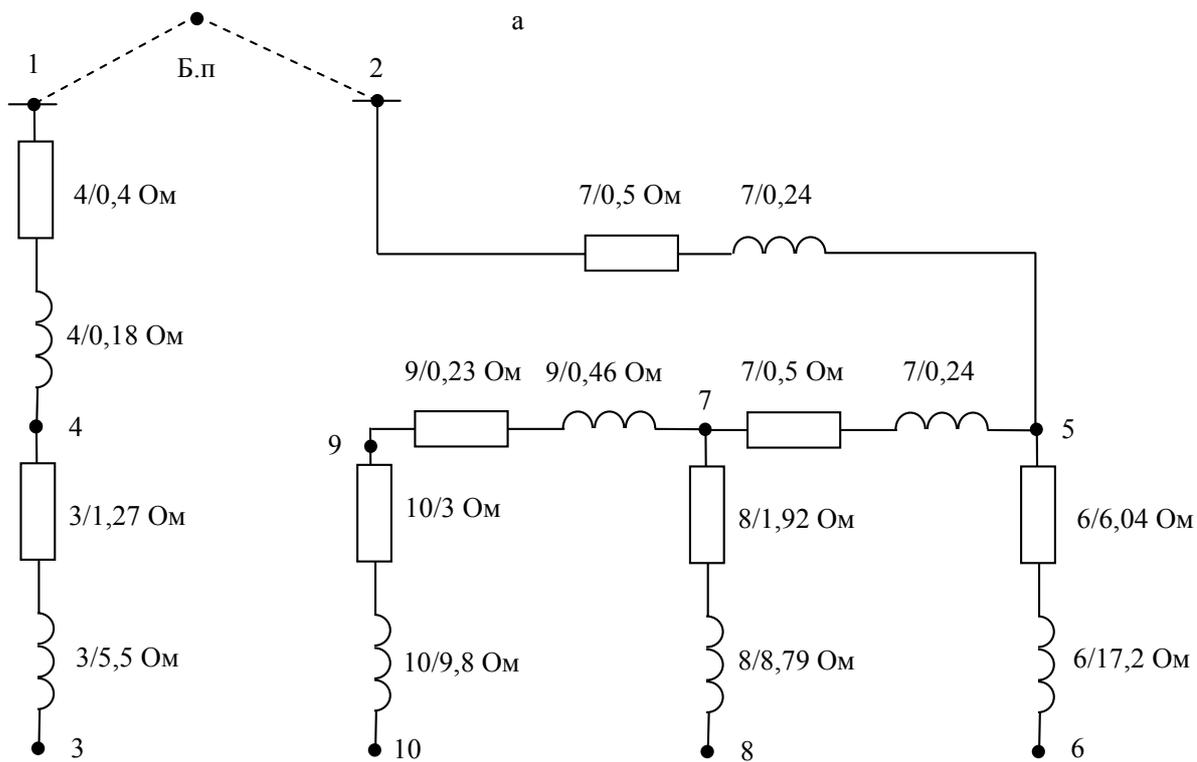
$tg \varphi = 0,12$ – нормативное значение тангенса φ .

$Q_{к\gamma\Sigma} = 750$ – общая мощность устанавливаемых КУ, кВар;

$C_{\varepsilon} = 0,9$ – стоимость одного кВт·час электрической энергии, грн/ кВт·час;



а



б

Рисунок 1 – Принципиальная схема электроснабжения (а) и схема замещения (б)

$K_{кв} = 50$ – стоимость установки одного кВар компенсирующей мощности напряжением 10 кВ, грн/кВар;

$K_{кн} = 90$ – стоимость установки одного кВар компенсирующей мощности напряжением 0,4 кВ, грн/кВар.

Результаты расчётов произведены в табл 1.

Таблица 1 - Результаты расчётов.

№ п/п	Наименование	№ узла на схеме	Варианты	
			I	II
1	$Q_{ку}$ кВар	1	0	0
		2	0	0
		3	160	266
		4	0	0
		5	0	0
		6	0	8,18
		7	0	0
		8	330	226
		9	0	0
		10	260	248
2	ΔP – потери мощности, кВт		15,8	12,9
3	K_n – нормативные отчисления, грн		10120	10120
4	K_a – отчисления на амортизацию, грн		6750	6750
5	$C_э$ – стоимость потерь электроэнергии, грн		12460	10170
6	Z – расчётные затраты, грн		29330	27050
7	$Q_{ку\Sigma}$ – устанавливаемая мощность, кВар		750	750

Выводы. В результате оптимального размещения компенсирующих устройств используя метод неопределённых множителей Лагранжа получается экономия электрической энергии в размере 2,9 кВт, при этом годовая экономия составляет 25400 кВт·час/год.

Список литературы

1. Казанцев Ю.И. Экономия электроэнергии в электрической сети ВАТ “Вторчермет” за счёт оптимального размещения компенсирующих устройств методом сопряженного градиента: сб. наук, праць за матеріалами Всеукр. наук.-практ. конф. [“Сучасні методи і дослідження системи автоматизації, енергозбереження в промисловості та сільському господарстві”] /М-во осв. України, Кіров. нац. техн. ун-т. – К.: Кіров. нац. техн. ун-т., 2007. – 48 с.
2. Компенсация реактивной мощности и выбор экономических сечений проводов при статическом задании нагрузок: сб. научных трудов НЭТИ /наук. ред. С.И. Кижнер – Новосибирск, 1981. – 56 с.
3. Расчёт некоторых статических характеристик токов и напряжений в электрических сетях при вероятностном задании нагрузок: сб. научных трудов НЭТИ /наук. ред. В.Я. Ольховский. – Новосибирск, 1981. – 79 с.
4. Тихоном А.И., Методы решения некорректных задач /Тихоном А.И., Арсенин В.Я. – М.: “Наука”, 1979. – 254 с.
5. Казанцев Ю.И. Основная энергетическая характеристика промышленных предприятий с массовым выпуском однородной продукции / Казанцев Ю.И. – М.: Известия СО АН СССР, 1970. – 56 с.
6. Оскар Ланге. Оптимальные решения /Оскар Ланге. – М.: “Прогресс”, 1967. – 198 с.

Plieshkov Hryhorovych, Uri Kazancev, Ruslan Teluta

National Technical University of Kirovograd

The electrical energy saving in power systems of enterprises through the optimal placement of compensating devices using the Lagrange uncertain multipliers method

The electrical energy saving in power systems of enterprises through the optimal placement of compensating devices using the Lagrange uncertain multipliers method.

Rational power consumption is not a trivial question. Power saving is everyday task of energy control engineering service of enterprises. Power saving task through optimal placement of compensating devices is investigated in article. The method of optimal placement of compensating devices through uncertain Lagrange multipliers was investigated in article

Promised power saving in result of optimization reach 2,9 kWt, also promised power saving per year reaching 25400 kWt-h/year.

compensating devices, electrical power, stochastic characteristics, optimization methods

Одержано 24.04.14

УДК 681.516.54

О. П. Голик, доц., канд. техн. наук, Р. В. Жесан, доц., канд. техн. наук
Кировоградський національний технічний університет

Критерій послідовності вмикання енергоустановок при автономному електропостачанні

Запропоновано критерій послідовності вмикання енергоустановок в системах електропостачання з автономними джерелами енергії.

відновлюване джерело енергії, електропостачання, енергоустановка, функція мети, коефіцієнт ваги показника

Е. П. Голик, доц., канд. техн. наук, Р. В. Жесан, доц., канд. техн. наук
Кировоградский национальный технический университет

Критерий последовательности включения энергоустановок при автономном электроснабжении

Предложен критерий последовательности включения энергоустановок в системах электроснабжения с автономными источниками энергии.

возобновляемый источник энергии, электроснабжение, энергоустановка, целевая функция, весовой коэффициент показателя

Вступ. Автономні енергоустановки потужністю від декількох сотен ват до декількох сотен кіловат є широко розповсюдженими в різних галузях господарства, де поза систем централізованого електропостачання знаходяться багато автономних споживачів. Зараз електропостачання автономних споживачів забезпечується в основному за допомогою бензинових та дизель-генераторів, експлуатація яких вимагає значних витрат на періодичне завезення пального та обслуговування установок. Додатковими негативними факторами використання таких установок є викиди продуктів згорання в навколишнє середовище та шум.

Наразі все більш широкого використання знаходять комбіновані системи, до складу яких входять як резервні електростанції (бензинові, дизельні генератори, тощо) так і відновлювані джерела енергії (ВДЕ). Використання ВДЕ в таких системах дозволяє економити пальне. Проте такі технічні рішення не завжди призводять до