

УДК 621.311

В.К. ТУВАРЖИЕВ, канд. техн. наук, **Е.А. ЛЕНЧЕВСКИЙ**, канд. техн. наук (Институт общей энергетики НАН Украины, Киев), **Е.П. Борсук**, канд. техн. наук (Академия ГНС Украины, Киев)

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОЦЕНКИ СЕЛЕКТИВНОЙ РАЗГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ "ЭФФЕКТ-ЗАТРАТЫ"

Предложено несколько принципов совершенствования режимов ограничения нагрузок по нескольким критериям: потерь мощности, удельным ущербам, технико-экономическим характеристикам устройств телеуправления. Разработаны алгоритм и структура системы автоматического ограничения электропотребителей (САОЭ) на уровне "Облэнерго".

Принудительные ограничения нагрузок электропотребителей при дефиците активной мощности и снижении частоты в энергосистеме приводят к значительному ущербу в электросетях и у потребителей.

Выполненный в [1] обзор методик и моделей решения задачи управления электропотреблением при дефиците активной мощности показал, что в них используются одинаковые целевые функции, учитываются только энергетический и экономический показатель (критерий) и не используются крайне важные показатели, характеризующие состояние электрических сетей, устройств телеуправления и регулирования. В этих методиках решение сводится к минимизации затрат и стоимости ущерба, общая технико-экономическая эффективность методов и способов управления не оценивается, варианты альтернативных систем реализации ограничений не рассматриваются.

Отметим, что главной целью функционирования системы селективного автоматического ограничения электропотребления (САОЭ) является сведение к минимальным значениям глубины отката и степени ограничения потребителей. Т.е. система должна обеспечить соотношения:

$$\Delta P = (P_c - P_r) \rightarrow \min; \varepsilon = (P_c - P_r) / P_c \rightarrow \min.$$

При этом она должна управлять нагрузкой: отключать, включать, регулировать – при ограничении $P_0 < (0,05-0,25) \times P_c$ определенного количества потребителей N при времени ограничения $t_{ог}$. Кроме того, система должна характеризоваться несколькими важнейшими показателями: иметь определенную информационную емкость I , дальность действия L , быть экономичной.

Необходимо также подробно исследовать технологические процессы, режимы и характеристики электрооборудования, зависимости удельных ущербов потребителей от объемов и длительности ограничений при номинальном напряжении $U_{н}$ и его отклонениях. В [2, 3] представлены наиболее полные результаты исследований режимов

потребителей-регуляторов (ПР) при дефиците активной мощности в энергосистеме, рассмотрены технологические приемы выравнивания графиков нагрузок ЭЭС: снятие пиков, заполнение ночных провалов, регулирование интервалов включения, отключения электроприемников.

С учетом дискретности работы ПР, минимизация ущербов определяется с помощью целевой функции:

$$\Phi = \sum_n \sum_t^T Y_{n,t} \cdot X_{n,t} = \min,$$

где n – номер ПР; $X_{n,t}$ – булевы переменные; T, t – ступени ПР, при ограничении активной мощности на каждой ступени и минимизации затрат Z при регулировании мощности:

$$Z = K_E + U_{п} + U_{д} + P_c \rightarrow \min,$$

где $U_{п}$ – стоимость прямых ущербов (нарушение технологий, простой персонала, порча сырья и т.д.); $U_{д}$ – стоимость дополнительных ущербов (недовыработка продукции, снижение прибыли, недопоставка продукции); P – заявленная мощность при номинальном напряжении $U_{н}$; C – стоимость 1 кВт.ч в максимуме графика нагрузок; K_E – нормативный коэффициент капитальных вложений.

При учете отклонений питающего напряжения V и его нестандартности, следует внести поправку на ущерб, вызванный отклонениями напряжения согласно [4]:

$$Y_v = \frac{\partial Z}{\partial U_i} \cdot V + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 Z}{\partial U_i^2} \cdot V^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^3 Z}{\partial U_i^3} \cdot V^3 + \dots$$

Как показали авторские исследования качества $U_{н}$ и режимов различных электропотребителей, отклонения V являются функцией многих переменных, главные из которых: отклонение частоты, несинусоидальность, несимметрия $U_{н}$ [5].

Для обеспечения живучести САОЭ в изменяющихся условиях системы производства и пот-

ребления электроэнергии нужно выполнить несколько оптимизационных задач для оценки и выбора лучших альтернативных решений по структуре САОЭ и алгоритмам ее функционирования.

С целью совершенствования принципов разгрузки ЭЭС в [1, 8] использован многокритериальный метод "Эффект-Затраты" и логическая схема определения общего показателя эффективности $W_0 = W_1 \times W_2 \times W_3 / (W_4 \times W_5)$ технической системы "ЭЭС-САОЭ-электропотребители".

С их помощью достаточно просто оценить W_0 каждого альтернативного варианта построения САОЭ. Причем он позволяет каждый показатель (параметр) изменять и исследовать поочередно, например по методу Гаусса-Зейделя [6]. В основе этого метода лежит алгоритм поочередного расчета изменения одного показателя (параметра) в соответствии с уравнением:

$$W_i^{(k+1)} = W_i^k - a_i \text{Signy}[\Delta W_0^k \cdot \Delta W_i^k],$$

где $k, k+1$ – шаг поиска оптимизируемого параметра; a_i – длина шага по i -му параметру; ΔW_0 – приращение ОПЭ: $\Delta W_0 = W_0^{k+1} - W_0^k$:

$$\text{Signy} - \text{функция знака} = \begin{cases} 1 \text{ при } Y > 0 \\ 0 \text{ при } Y = 0 \\ -1 \text{ при } Y < 0. \end{cases}$$

С помощью этого метода и алгоритма поочередно на каждом шаге оптимизируется W_0^k по каждому параметру (показателю) W_i^k для каждого (от 1 до m) и производится сравнение $W_0 = (W_i^{k+1}) \neq W_0(W_i^k)$ в соответствии со схемой поиска максимума $W_0 = \max$ (рис. 1).

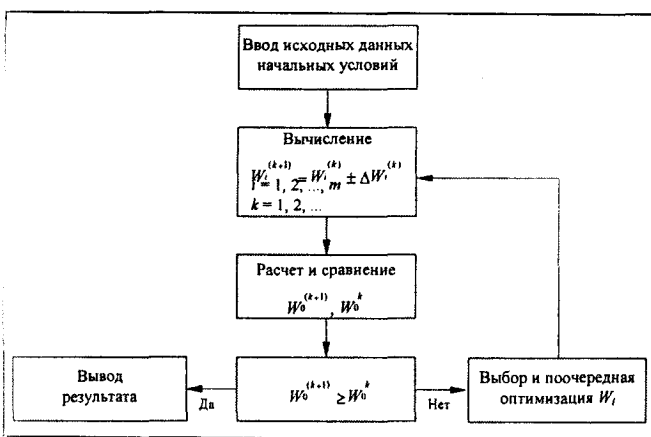


Рис. 1

Пример построения САОЭ на основе выбранных моделей и разрабатываемой концепции для "Облэнерго", характеризующейся следующими параметрами:

1. Среднемесячное потребление электроэнергии – $\mathcal{E}_{\text{с.м.}}$: $200 \text{ млн кВт.ч} < \mathcal{E}_{\text{с.м.}} < 250 \text{ млн кВт.ч}$, $P_{\text{max}} = 242,0 \text{ МВт}$.

2. Электропотребители – преобладают предприятия машиностроительной и легкой промышленности.

3. Стоимость недоотпущенного 1 кВт.ч – 0,85 грн.

4. Число объектов, допускающих ограничения активной мощности: $N_0 = 480$.

5. Значение ограничиваемой мощности P_0 находится в пределах $(0,05-0,1) P_{\text{max}}$: $12 \text{ МВт} = P_0^* < P_0 < P_0^* = 24 \text{ МВт}$.

6. Минимальная мощность ограничения одного объекта: $P_{\text{omin}} = P_{\text{max}} / N_0 = 0,5 \text{ МВт}$;

7. Количество каналов с устройствами, реализующими селективное ограничение электропотребления: $n = P_0 / P_{\text{omin}}$: $24(\text{min}) < n < 48(\text{max})$;

8. Стоимость одного канала с устройствами селективного ограничения (УСО) отечественного производства – 1000-1600 грн., а иностранного производства – 2800-3000 грн.

9. Базисные параметры электросети: $S_6 = 480 \text{ МВА}$, $U_6 = 110 \text{ кВ}$, $I_6 = 4,36 \text{ кА}$, $L_6 = 250 \text{ км}$ – наибольшая длина радиальной линии 110-35 кВ от головной ПС 330/110 кВ;

10. Удаленность УСО от ПС 330/110 кВ: $2 \text{ км} < l < 220 \text{ км}$.

Из приведенных параметров 1, 2, 3, 9 – известные (детерминированные), остальные определяются и задаются исследователями-разработчиками как исходные данные и начальные условия, ограничения. Учитывая рекомендации [7, 8] по свертыванию частных показателей эффективности в ОПЭ, т.е. при вычислении W_0 целесообразно задаваться базисными W_6 – желаемыми или эталонными, значениями каждого частного показателя (по аналогии с целевым программированием) и, при расчете W_0 , использовать отношение W_i / W_{i6} . Таким образом, параметры (показатели) в расчете будут представлены относительными единицами, что упрощает расчеты необходимого количества альтернативных вариантов.

Важнейшими (критериальными) техническими показателями в относительных единицах в рассматриваемой задаче являются следующие:

1. Мощность ограничения W_1 , лежащая в диапазоне нижних и верхних значений: $0,05 = P_0^* / P_{\text{max}} < W_1 < P_0^* / P_{\text{max}} = 0,1$.

2. Дальность действия W_2 САОЭ в границах: $0,008 = l'' / L_6 < W_2 < l' / L_6 = 0,9$.

3. Информационная емкость W_3 САОЭ – количество каналов и УСО $0,05 = P_o'' / (P_{omin} N_o) < W_3 < P_o'' / (P_{omin} N_o) = 0,1; 24/480 < n < 48/480$.

К экономическим (стоимостным) показателям, которые целесообразно уменьшать, относятся: W_4 – ущерб предприятиям (за час простоя) $U = P_o \times y$, при $t = 1$ час $y = 0,85$ грн./кВт.ч: $0,0425 = y P_o'' / P_{max} < W_4 < y P_o'' / P_{max} = 0,085$; W_5 – стоимость системы САОЭ:

– при минимальной стоимости одного канала с УСО: $0,0178 = (n'' / N_o) (C_o / C_{umax}) < W_5 < (n'' / N_o) (C_o / C_{umax}) = 0,054$;

– при максимальной стоимости канала с УСО: $0,027 = (n'' / N_o) (C_o'' / C_{umax}) < W_5 < (n'' / N_o) (C_o'' / C_{umax}) = 0,054$.

Определим обобщенный показатель эффективности W_o при подстановке в его расчетную формулу нижних значений в относительных единицах при минимальной стоимости $W_5 = 0,0178$ одного канала с УСО. Принятые значения являются одновременно исходными значениями в алгоритме поочередного расчета каждого показателя (рис. 1):

$$W_o = 0,028 = W_o^*$$

Используя формулу и алгоритм (рис. 1), определяем новое значение W_o при максимальной стоимости одного канала с УСО ($W_o = 0,027$), полученная разница $\Delta W_o^* = -0,00958$ свидетельствует об уменьшении значения обобщенного показателя.

Продолжив поиск наибольшего значения W_o в области верхних значений $W_1'' - W_4''$ при минимальной стоимости канала с УСО ($W_5 = 0,0356$), в результате получили значительное увеличение обобщенного показателя $W_o = 2,9748$. При введении наибольшей, иностранной, стоимости канала с УСО, показатель W_o уменьшается до 1,958.

На основании полученных расчетов можно утверждать, что при принятых исходных данных Облэнерго и системы САОЭ, максимальное значение $W_{o,max}$ находится в области верхних значений параметров, т.е. большем числе: управляемых потребителей (большей мощности), дальности действия САОЭ и меньшей стоимости каналов и УСО.

Техническая реализация управляемого блока системы САОЭ возможна с помощью структуры из шести основных блоков, функционирующих по двухканальной схеме (рис. 2), где 1 – измерительный преобразователь (датчик) активной

мощности P_r , поступающей из энергосистемы на подстанции электрообеспечения контролируемых потребителей или потребителей-регуляторов. Датчик имеет два выхода. На первом выходе сигнал появляется, когда $P_r > P_c$, где P_c – мощность, согласно плановой потребности; на втором – сигнал появляется, когда $P_r < P_c$. 2 – блок первого канала для распределения-регулирования нагрузок электропотребителей. 3 – блок второго канала, для сравнения производной фактической мощности dP_r / dt с производной мощности потребления dP_c / dt , т.е. анализируется их неравенство. Возможен также анализ интегральных значений $P_r > < P_c$, в результате определяются разница и знак сравниваемых величин. 4 – блок регулирования ограничений электропотребления. 5 – блок обратной связи, контролирующей распределение нагрузки электропотребителей. 6 – блок обратной связи, контролирующей уменьшение нагрузки и отключение необходимых электропотребителей.

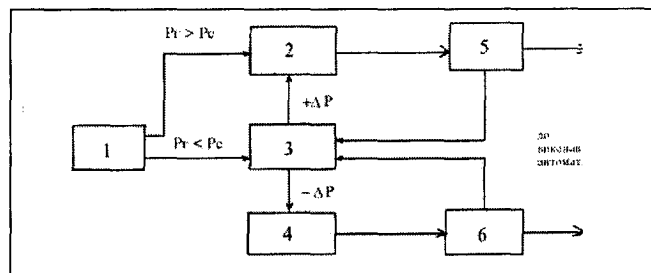


Рис. 2.

В качестве датчика 1 можно использовать информационно-электроизмерительный прибор ИТЕК-210, разработанный НТТУ "КПИ" (Киев), а в качестве измерительных, логических и регулируемых блоков – устройства 2ТРМ1, ТРМ10 украинско-российских фирм ТЕРА-ОВЕН.

В структуре САОЭ целесообразно иметь индикатор частоты энергосистемы, сигналы которого подаются на управляющую микроЭВМ. Принципиальная схема реализации САОЭ на ПС 110(35) кВ изображена на рис. 3. Такая схема совместно с современными комплексами автоматизации SСKADA, SCHNEIDER, ТЕРА и другими, которые используются в системах ОИК АСДУ и АСУ ТП подстанций.

В качестве каналов передачи данных и обратной связи целесообразно использовать линии электроснабжения – 0,4; 6; 10; 35; 110 кВ и передатчики приемники, разработанные в [9, 10, 11].

Одним из направлений усовершенствования этих систем является применение новых подхо-

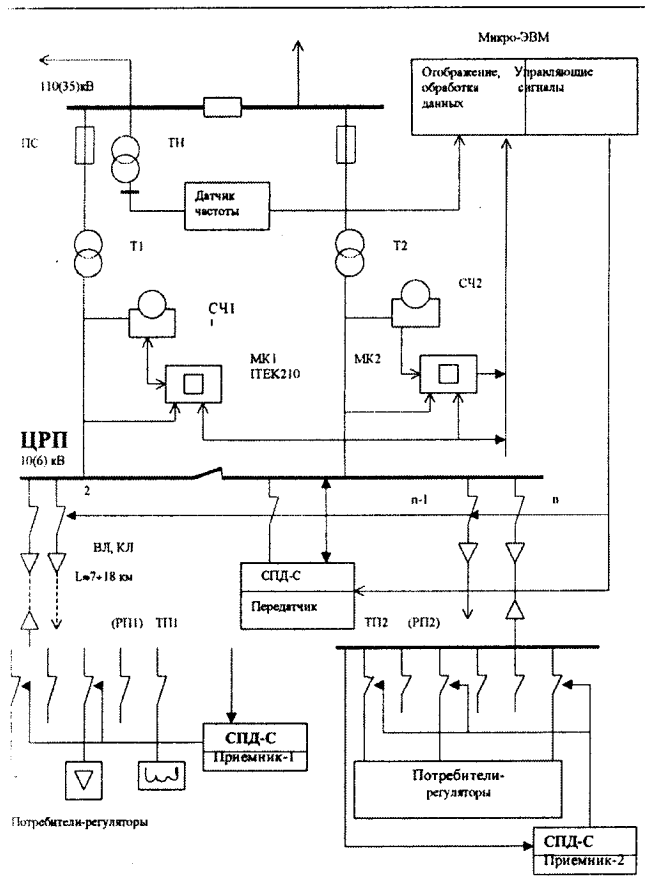


Рис. 3

дов в кодировании передаваемых сигналов, предложенных в Институте общей энергетики НАН Украины. Особенностью этого способа кодирования является возможность обеспечить передачу данных при меньшем, чем в имеющихся цифровых кодах, количестве бит за меньшие промежутки времени.

Известные методы сжатия и преобразования информации касаются, как правило, внутрипроцессорных систем и не касаются каналов передачи данных. К таким кодам следует отнести – циклические, взвешенные десятичные и двоично-десятичные (например, коды 8421 и 2421).

Новый способ кодирования обеспечивает большее количество информации (емкость) в отличие от машинного (двоичного) кода при одинаковом количестве кодовых позиций [11].

На рис. 4 изображена временная диаграмма способа сжатия информации, которая реализована в макете системы передачи данных по электролинии: 0,4/0,22 кВ. Согласно диаграмме передача восьмибитовых посылок осуществляется двумя импульсами, изменяющими свое положение по шестнадцати временным позициям.

Проведенное технико-экономическое сравнение систем передачи информации по линиям 0,4-

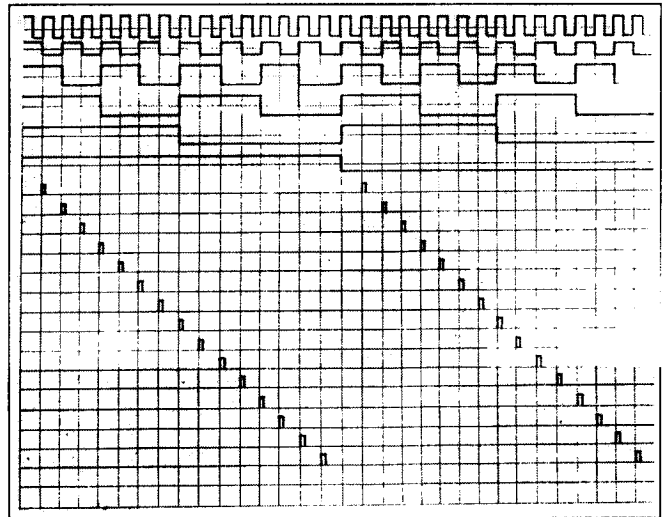


Рис. 4

110 кВ показало целый ряд преимуществ новой системы:

- работа по уже действующим линиям электропередач 0,4-110 кВ – как с высокочастотной обработкой, так и без нее;
- высокая помехоустойчивость за счет использования трех качественных признаков сигнала;
- высокое быстродействие 1200-3600 байт/с по сравнению с имеющимися аналогами;
- себестоимость таких систем на порядок ниже зарубежных аналогов.

Способы автоматического управления (телеуправления) электрическими нагрузками потребителей получили большое распространение за рубежом. К примеру, технические средства управления (ТСУ), используемые в этих целях, в зависимости от назначения делятся на четыре категории. К первой относятся ТСУ диспетчерских пунктов, которые позволяют контролировать параметры электропотребления по жестко заданной программе. Стоимость одного комплекта ТСУ составляет 1000-4000 у.е.

Ко второй категории относятся ТСУ, предназначенные для сигнализации и регулирования величин максимальной нагрузки электропотребителя и общих расходов электроэнергии. Число подключаемых объектов составляет от 16-и до 48-и. Программы управления могут изменяться действиями оператора. Стоимость канала регулирования – 300-1000 у.е.

К третьей категории относятся ТСУ на базе мини-ЭВМ, которые осуществляют сигнализацию, регулирование, оптимизацию графика прохождения максимума и др. Число каналов регулирования может быть от 48-и до 640-а. Установленная стоимость на один канал регулирования

составляет 200-800 у.е., а стоимость основного устройства – 20-80 у.е.

Наконец, к четвертой категории относятся ТСУ общего типа, выполняющие те же функции, что и приведенные выше ТСУ, а также автоматическое управление нагрузками потребителей и полную переработку информации. В системе управления могут быть задействованы несколько тысяч каналов регулирования.

Для успешной реализации в Украине систем управления нагрузками, прежде всего, необходимо создание новых, более усовершенствованных каналов передачи данных, но с более низкой се-

бестоимостью. К таким опытно-промышленным разработкам следует отнести комплекс устройств телемеханики по линиям электроснабжения 0,4-0,22 кВ разработки Института общей энергетики НАН Украины, комплекс КТМ-22.01, а также систему разгрузки АЦР 110-35-10 кВ разработки Института электродинамики НАН Украины, систему КТУ-КТС разработки Института "Сельэнергопроект" и НТТУ "КПИ", а также устройства СКЭР выполненные и внедренные АО "ЭКОСИС" и ПО "РАДИОПРИБОР" (Запорожье) при использовании выделенных телефонных каналов.

1. Туваржиев В.К., Дубовской С.В., Ленчевский Е.А. Методы и модели оптимизации ограничения электропотребления при дефиците мощности в энергосистеме // Проблемы загальної енергетики. - 2002. - № 1. - С. 4-6.
2. Михайлов В.В. Потребители-регуляторы в народном хозяйстве // Промышленная энергетика. - 1980. - №1. - С. 4-6.
3. Бойко Ю.В., Синяченко И.В., Холмский Д.В. Потребители -регуляторы электрической мощности. - К.: Препринт ИПЭ НАН Украины, 1992. - 40 с.
4. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. - К.: Техника, 1981. - 160 с.
5. Туваржиев В.К., Ленчевский Е.А. Качество напряжения и режимы работы электропотребителей // Проблемы стандартизации в энергетике и энергосбережении. Тез. конф. - К., 1991. - С. 19-20.
6. Керного В.В. Автоматизация некоторых расчетов электрических сетей. - Минск: Наука и техника, 1968. - 140 с.
7. Гультияев А. Имитационное моделирование в среде WINDOWS. - СПб: КОРОНАпринт, 1999.
8. Гличев А.В. Экономическая эффективность технических систем. - М.: Экономика, 1971. - 268 с.
9. Туваржиев В.К., Ленчевский Е.А. и др. Разработка и испытания системы ЦТУ по электросетям 35-110 кВ / Экспресс-информация. Энергетика и электрификация. - 1983. - Вып. 3. - С. 21-24.
10. Патент Украины 18780. Способ кодирования и декодирования дискретных сигналов / Ленчевский Е.А., Туваржиев В.К., Тонкаль В.Е., Михайлов А.М. - Б.И. - 1997. - № 6.
11. Туваржиев В.К., Ленчевский Е.А., Олейник К.Л. Разработка программных и технических средств СУ энергопотребителями по проводам ЛЭП. - К.: Автоматика-98, 1998. - Ч. I. - С. 307-311.