

## СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ, СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОПРИЁМНИКИ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

В. П. Метельский, А. П. Заболотный, Д. В. Федоша, Ю. В. Даус

*Предложен подход и разработан алгоритм построения структуры системы цехового электроснабжения радиальной топологии, учитывающий наличие в системе электроприёмников с рекуперацией электроэнергии и одновременно решающий задачи определения числа узлов нагрузки и координат их установки, распределения между ними электроприемников, определения конструктивного исполнения источников питания.*

*Ключевые слова: алгоритм, система цехового электроснабжения, рекуперация, источник питания.*

Тенденция роста тарифов на электрическую энергию обуславливает значительное увеличение составляющей стоимости потерь электроэнергии в сетях при ее передаче, распределении и потреблении. Особую актуальность это приобретает в сетях цехового электроснабжения (ЦЭС), что обусловлено их разветвленностью и использованием низких классов напряжения. Уменьшение составляющей стоимости потерь электроэнергии при ее передаче и распределении возможно путем оптимизации структуры ЦЭС, а составляющей стоимости потерь электроэнергии при ее потреблении – посредством внедрения новых энергосберегающих технологических процессов и, в частности, путем замены существующего нерегулируемого электропривода на автоматизированный регулируемый, обеспечивающий рекуперацию электроэнергии в питающую сеть.

До недавнего времени накопленная энергия в высокоинерционных нагрузках (стенды нагрузок, подъёмнотранспортные механизмы, намотчики, центрифуги, конвейеры, сепараторы и т. п.) в режиме торможения с целью ограничения уровня величины напряжения в звене постоянного тока автономных инверторов, рассеивалась на специальных тормозных резисторах. Использование последних влечет за собой ряд определенных неудобств при их эксплуатации, а именно: большие габариты тормозных резисторов; разогрев поверхности их до температуры 100 °С и выше; обязательная защита резисторов от попадания пыли и влаги и т.д. При этом рассеиваемая электроэнергия (за которую предприятие платит деньги) превращается в ненужное тепло, и в теплое время года, когда температура в помещениях с техно-

логическим оборудованием достаточно высока требует дополнительной вентиляции, а в некоторых случаях – кондиционирования помещений.

Рост числа использования частотно-регулируемых асинхронных электроприводов, обеспечивающих улучшенные динамические свойства электропривода, а также рекуперацию электрической энергии в питающую сеть, при внедрении энергосберегающих технологических процессов в различных отраслях промышленности, обуславливает ряд технических проблем в ЦЭС. К ним относятся: решение проблем электромагнитной совместимости, необходимость замены коммутирующей и защитной аппаратуры; изменение настроек релейной защиты и автоматики. Но основная проблема несогласованного присоединения разрозненных электроприемников с рекуперацией (ЭПР) к сети – это сложность управления и прогнозирования режимов работы ЦЭС, связанные с возникновением перетоков мощности по сети, при этом структура такой ЦЭС не будет оптимальна с точки зрения потерь электроэнергии при ее передаче, распределении [1].

Ключевой задачей при формировании оптимальной структуры ЦЭС является задача определения количества источников питания с координатами их установки и распределение за ними приемников электроэнергии, а также оборудование промежуточных узлов нагрузки с учетом ЭПР и специфики используемых технологических процессов. Однако используемые в настоящее время методы проектирования структуры ЦЭС не учитывают наличие перетоков мощности в таких сетях, что обуславливает необходимость их развития.

Основные подходы при решении задач построения оптимальной структуры ЦЭС базируются на использовании оценочных и оптимизационных моделей. Первые служат для определения технико-экономических показателей для заданного проектировщиком варианта сети. Вторые – для определения оптимального варианта конфигурации сети в пределах принятых проектировщиком допущений в соответствии с принятым критерием оптимальности. При этом в оптимизационных моделях необходимо учитывать дискретность некоторых величин (сечение проводов и кабелей, мощность и количество трансформаторов, количество присоединений к РП и т. д.).

Анализ существующих методов решения задачи определения количества источников питания и распределение за ними приемников электроэнергии показал, что объединить оценочные и оптимизационные модели возможно на основе метода эквипотенциальных контуров [2].

Суть метода эквипотенциальных контуров заключается в проведении аналогии между нагрузкой приемников ( $P_i$ ), расположенных в точках  $(x_i; y_i)$ , и потенциалами некоторых источников энергии, расположенных в тех же точках. Потенциалы этих источников равняются нагрузкам приемников. При удалении от точки расположения приемника потенциал от источника, расположенного в той самой точке, будет уменьшаться и в некоторых отдаленных точках потенциал будет близок к нулю. Совокупность всех потенциалов источников энергии образует потенциальную поверхность, имеющую максимум, которую можно описать потенциальной функцией

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{-\alpha_{\Delta P_i} \cdot \text{Трасса}(i, x, y)}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – мощность  $i$ -ого электроприемника;

$x, y$  – координаты, в которых определяется значение потенциальной поверхности;

$\alpha_{\Delta P_i}$  – коэффициент, учитывающий ожидаемые потери в линиях; определяется по выражению (2);

Трасса ( $i, x, y$ ) – функция определения протяженности пути между  $i$ -м электроприемником и точкой с координатами  $x, y$ .

$$\alpha_{\Delta P_i} = \frac{P_i^2 \cdot \rho}{U^2 \cdot F_i}, \quad (2)$$

где  $P_i$  – мощность  $i$ -ого электроприемника;  
 $F_i$  – сечение проводника для подключения  $i$ -ого электроприемника;

$\rho$  – удельное сопротивление материала проводника;

$U^2$  – напряжение.

Использование предложенного коэффициента  $\alpha_{\Delta P_i}$  (выражение 2) дает возможность сразу оценить степень будущих потерь в проводниковом материале при определении центра электрических нагрузок.

Для учёта влияния ЭПР на значения координат центров электрических нагрузок, в которых будут установлены источники питания, строится аналогичная поверхность и для приемников, работающих в режиме рекуперации, при этом  $P_i$  принимает значение, равное величине рекуперированной энергии со знаком минус.

Таким образом, процедуру определения значения координат центров электрических нагрузок ЦЭС, содержащей ЭПР, можно представить в виде следующего алгоритма.

На первом этапе строится потенциальная поверхность для электроприемников в режиме потребления.

На втором этапе строится поверхность для режима, когда электроприемники отдают электроэнергию в питающую сеть.

Затем производится наложение этих поверхностей. На суммарной поверхности выделяется максимум функции, в координатах которого и будет расположен источник питания.

Важным моментом в определении этих координат является учет зон запрета прокладки линий и установки источников питания. Для этого можно использовать методы распознавания образов, в соответствии с которыми предусмотрено разбиение пространства объекта на области, которые не пересекаются, каждая из которых соответствует отображению одного и того же класса, к которому допустимо элементарное математическое описание [3].

Для формализации процесса, выбора конструктивного исполнения источника питания были введены понятия отбора электроприемников по «потенциальному» и «техническому» критериям.

Функция (1) является основой для «потенциального» критерия отбора, по которому на потенциальной поверхности определяется точка максимума потенциала. Эта точка в дальнейшем выступает в роли центра электрических нагрузок. Приемники, которые будут получать питание от этого центра электрических нагрузок по «потенциальному» критерию определяются как приемники, которые принимали участие в формировании макси-

## СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ, СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОПРИЁМНИКИ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

мума суммарной функции. Эти приемники зачисляются в "потенциальную" группу.

"Потенциальная группа" является законченным структурным элементом будущей ЦЭС, но тот факт, что при формировании "потенциальной" группы были учтены лишь расположение приемников относительно друг друга и ожидаемые потери электрической энергии в распределительной сети, не дает возможности однозначно включить "потенциальную" группу в структуру ЦЭС, так как необходимо провести согласование этой группы с возможным конструктивным выполнением узла нагрузки.

Для решения этой задачи предлагается использовать "технический" критерий отбора. "Технический" критерий отбора выполняет функцию согласования приемников "потенциальной" группы с возможным конструктивным выполнением ее источника питания. Критерий действует на основе принципа избыточности "потенциальной" группы по отношению к предельным условиям "технического" критерия. На основе взаимодействия "потенциального" и "технического" критериев отбора составляется алгоритм метода.

Принцип работы алгоритма базируется на образовании обратных связей, которые охватывают оба критерия и создают условия для становления алгоритма как самоорганизующейся модели построения структуры сети. В этом случае будут использоваться оценочные и оптимизационные модели одновременно, а полученное решение будет наиболее приближено к оптимуму и с меньшим влиянием элементов субъективизма проектировщика.

Рассматривая критерии отбора как предельные условия функционирования модели, предложенный подход дает возможность закладки в них дискретности конструктивных условий выполнения структуры сети, содержащей ЭПР.

Используя свойство предложенного подхода, согласно которому источником питания (включая и ЭПР), а также электроприемником могут выступать узлы любых уровней ЦЭС, возможно выполнить декомпозицию отдельных участков потенциальной поверхности для образования в пределах этих зон промежуточных узлов нагрузки. Это позволяет рассматривать эти промежуточные узлы нагрузки как приемники электрической энергии, при этом приемники, которые присоединяются к промежуточному узлу нагрузки, непосред-

венно не учитываются на потенциальной поверхности, т. е. исключаются, но потребляемая ими мощность учитывается на начальном уровне через мощность промежуточного узла нагрузки.

Целесообразность устройства промежуточных узлов нагрузки определяется на основе оценочной модели, исходные данные для которой (приемники, для которых возможно оборудование промежуточных узлов нагрузки) определяются по трём признакам: "по сильной технической группе"; "по слабой технической группе"; "по доле сильной группы" [4, 5].

Под термином "сильная техническая группа" понимается группа электроприемников, сформированная по "техническому" критерию, которая имеет оптимальный коэффициент загрузки источника питания, исходя из условий избыточности. Под термином "слабая техническая группа" понимается группа электроприемников, сформированная по "техническому" критерию, которая сформирована при условии недостаточности и коэффициентом загрузки источника питания меньшим за приемлемый. Под термином "доля сильной группы" понимается группа электроприемников "сильной группы", которая выделена из нее по дополнительным критериям (например, показатель разброса нагрузки, который используется в тензорном методе) [6].

Технико-экономический расчет базируется на сравнении двух вариантов выполнения локального участка структуры сети, границы которой определяются по приведенным выше трем признакам. Таким образом, метод сравнительной оценки предусматривает анализ локального участка структуры сети с определением ряда технически целесообразных вариантов ее выполнения и дальнейшее сравнение этих вариантов между собой по критерию удельных затрат.

Блок-схема алгоритма метода формирования структуры ЦЭС радиальной топологии, содержащей ЭПР, с учетом определения возможности установки промежуточных узлов нагрузки представлена на рисунке 1. Данный алгоритм позволяет не только автоматизировать построение оптимальной структуры ЦЭС, содержащей ЭПР, но и снизить размеры капитальных вложений при построении такой сети за счет применения промежуточных узлов нагрузки (определения их оптимального количества и местоположения).

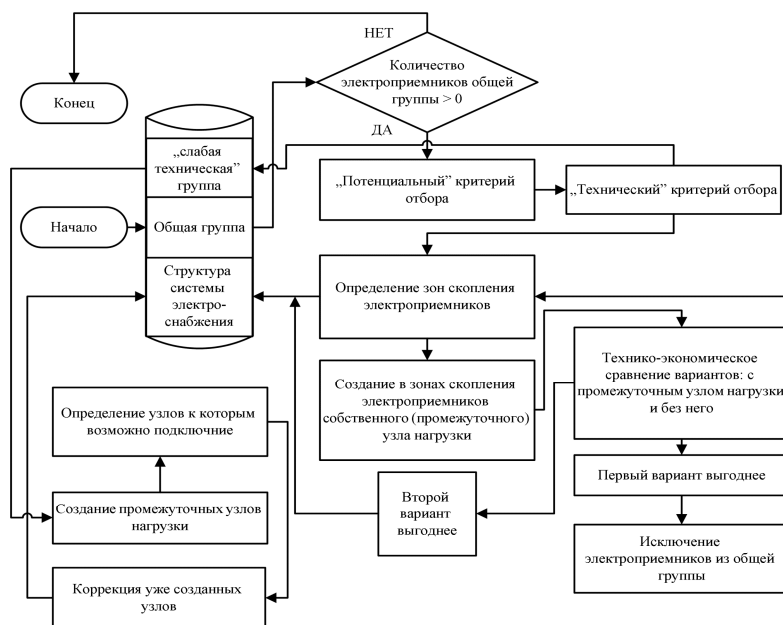


Рисунок 1 – Блок схема алгоритма метода формирования структуры ЦЭС радиальной топологии, содержащей ЭПР, с учетом определения возможности установки промежуточных узлов нагрузки

Предложенный алгоритм был реализован программно с помощью языка программирования Python и пакета математического вычисления SciPy. При этом, учитывая современный уровень развития фильтрокомпенсирующих устройств, были приняты следующие допущения: постоянство амплитуды, синусоидальность формы и симметричность фазных напряжений, рекуперируемых в питающую сеть [7].

В результате проведенных численных экспериментов для 20 объектов (цехов, участков, корпусов) промышленных предприятий, была получена усредненная структура годовых потерь электроэнергии и капиталовложений в сформированных ЦЭС методом эквипотенциальных контуров и предлагаемым методом (рисунок 2).

Анализ полученных результатов показал, что годовые потери электроэнергии в ЦЭС при использовании предлагаемого метода снижаются на 28 %, при увеличении стоимости капитальных вложений на 20 %. Это достигается в первую очередь снижением доли потерь в трансформаторах на 20 %, за счет более оптимальной их загрузки, и во-вторых за счет снижения потерь в распределительной сети на 7 % вследствие уменьшения длины более загруженных участков сети, путем смещения координат установки источника питания от ЭПР к более мощным электроприемникам. Изменение величины капитальных вложений обусловлено увеличением стоимости трансформаторного оборудования на 20 % и стоимости распределительной сети на 2 % при снижении стоимости питающей сети на 2 %.

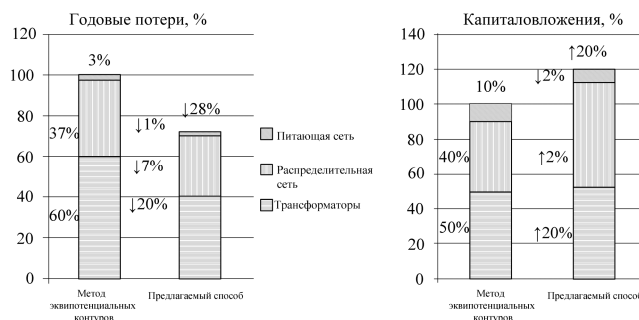


Рисунок 2 – Усредненная структура годовых потерь электроэнергии и капиталовложений в сформированных ЦЭС

## СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ, СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОПРИЁМНИКИ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

### ВЫВОДЫ.

Предложенный подход к построению структуры систем цехового электроснабжения радиальной топологии, содержащих электроприёмники с рекуперацией электроэнергии, позволяет обеспечить одновременное решение трех основополагающих задач проектирования систем электроснабжения: определения числа узлов нагрузки и их координат, оптимального распределения между ними электроприемников, определения мощности источников питания, а также формирования оптимальной топологии сети по критерию минимума потерь электроэнергии в сетях при ее передаче, распределении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заболотный, А. П. Макромоделирование процессов энергообмена в системе «Электропривод – Сеть» на основе принципов декомпозиции и редукции // А. П. Заболотный / Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков : НТУ «ХПИ», – 2010. № 28. – С. 218–219.
2. Авдеев, І. В. Розвиток методу еквіпотенційних контурів для проектування розподільчої мережі / І. В. Авдеев, А. П. Заболотний, Д. В. Федоша, С. А. Теліпайло, В. С. Мамбаєва // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Тематичний випуск "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – 2009, – № 637. – С. 3–7.
3. Качан, Ю. Г. О возможности распознавания топологии оптимальной системы электроснабжения / Ю. Г. Качан, В. В. Дьяченко. // Гірничя електромеханіка та автоматика. – 2007. – № 78. – С. 3–5.
4. Заболотный, А. П. Алгоритм визначення проміжних вузлів навантаження радіальних розподільчих мереж / А. П. Заболотний, Д. В. Федоша, К. І. Парусімова, С. В. Усенко // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. – № 1. – С. 66–71.
5. Заболотный, А. П. Формирование узлов нагрузки при синтезе структуры ЦЭС радиальной топологии / А. П. Заболотный, Д. В. Федоша, А. М. Меньков, В. С. Мамбаева // Наукові праці донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2013. – № 1(14). – С. 96–99.
6. Федоров, А. А. Характеристики и алгоритмы формирования и отбора вариантов систем промышленного электроснабжения / А. А. Федоров, С. В. Садчиков // Электричество, 1982, № 2. – С. 27–31.
7. Заболотный, А. П. Влияние электроприводов с рекуперацией энергии на структуру системы электроснабжения / А. П. Заболотный, Д. В. Федоша, А. С. Купревич // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011, – № 3. – С. 402–403.

**Федоша Д. В.**, ассистент, E-mail: [fdv@zntu.edu.ua](mailto:fdv@zntu.edu.ua); **Даус Ю. В.**, аспирант, E-mail: [zirochka2505@ukr.net](mailto:zirochka2505@ukr.net); **Заболотный А. П.**, к.т.н. доцент, E-mail: [zap@zntu.edu.ua](mailto:zap@zntu.edu.ua), **Метельский В. П.**, к.т.н., профессор, Украина, Запорожская область, г. Запорожье, Запорожский национальный технический университет, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», +38(0617)698280.