

уровень потерь 7,545 %; одновременно видно, что с увеличением отношения  $\frac{R_{эл}}{R_{эт}}$  оптимальная нагрузка сети снижается у РЛ № 2 она составляет 26,61 %, для РЛ № 21 – 18,45 %, для РЛ № 7 – 11,66 %.

В тех случаях, когда исходная нагрузка сети близка к оптимальной, все три уровня потерь электроэнергии в сети (фактические, оптимальные по критерию минимума суммарных потерь электроэнергии и экономическому) близки друг к другу: РЛ № 21 – 6,071, 6,028 и 6,178 %; РЛ № 46 – 3,314, 3,304 и 3,402 %; РЛ № 53 – 1,504, 1,503 и 1,629 %.

Суммарные фактические потери электроэнергии по РЭСу составляют 1 064,895 кВт·ч – 8,445 %, оптимальные по критерию минимума потерь электроэнергии – 1 049,191 кВт·ч, что составляет 4,507 %, оптимальные по критерию минимума стоимости передачи электроэнергии – 1 391,797 кВт·ч, что составляет 4,652 %.

Из анализа следует, что резерв по снижению технических потерь электроэнергии по минимуму суммарных потерь составляет 3,938 %, а по минимуму стоимости передачи электроэнергии – 3,793 %.

Наибольший эффект при замене трансформаторов будет для тех распределительных линий, для которых разница между фактическими и оптимальными потерями будет больше, и далее этот эффект снижается при уменьшении этой разницы.

Количество неучтенной энергии колеблется в пределах от минус 302,16 % (Мотоль\Т-1\С1 РЛ-108) до 92,46 % (Ополь\Т-1\С1 РЛ 185), причём, у 30-и распределительных линий неучтенная электроэнергия получилась с положительным знаком, а у 11-и распределительных линий – с отрицательным. У 18-и из этих 30-и распределительных линий величина неучтенной электроэнергии превышает 50 %.

Положительный знак у величины неучтенной электроэнергии показывает на очаги коммерческих потерь, существенной составляющей которой является хищение электроэнергии, а отрицательный знак свидетельствует о том, что потребители на данный момент за электроэнергию переплатили.

Большой процент неучтенной электроэнергии на шинах 0,38 кВ объясняется недостоверностью данных об оплате за электроэнергию.

### Литература

1. Фурсанов, М.И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2005. – 207 с.

УДК 621.311

## ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА РЕЖИМА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СХОДИМОСТИ

*Гапанюк С.Г., Вацкель С.Л.*

Научные руководители – БОБРОВ А.В.,

канд. техн. наук, доцент ШИМАНСКАЯ Т.А.

Сегодня для исследования режимов электрических систем, определения зависимостей между параметрами сети (нагрузками, напряжениями узлов, сопротивлениями, потоками мощностей на участках и т. д.) необходимо иметь программу расчета режима. Использование промышленных программ не всегда является удобным из-за их высокой стоимости и невозможности внесения необходимых условий расчета и поправок, со-

гласно поставленной задачи. Поэтому на наш взгляд для анализа и исследования режимов работы системы, при задании специфических условий расчета, необходимо иметь собственную программу. Данная работа посвящена выбору оптимального метода расчета режима. Основными критериями выбора метода являются: скорость работы, простота реализации и глубина расчета режима, которая подразумевает под собой возможность расчета некоторого предельно утяжеленного режима.

В нашей работе мы провели исследование сходимости различных итерационных методов при помощи программирования в математическом пакете Mathcad 13. Данный вопрос стал актуальным уже в 60–70 годах прошлого века, на начальном этапе внедрения ЭВМ в вопросы расчета режимов электрических сетей. По мере развития электронно-вычислительной техники появляется возможность программной реализации все более сложных и объемных электроэнергетических задач. В наше время с появлением быстродействующих компьютеров и развитого их программного обеспечения, а также различных программных пакетов таких как Mathcad, Matlab и др. решение многих технических задач значительно упрощается. Таким образом в работе на примере небольшой схемы удалось произвести анализ сходимости различных итерационных методов таких как метод узловых и обращенных узловых уравнений, метод Ньютона и метод с использованием матрицы коэффициентов распределения (обобщенных параметров). Расчеты производились для двух различных схем, результаты расчетов, приведенные в таблице 1, позволяют определить и проанализировать некоторые закономерности при расчете тем или иным методом.

Результаты расчета заданного и утяжеленного режимов позволяют сказать, что при исходном режиме (коэффициент утяжеления равен 1) все использованные итерационные методы дают необходимый результат достаточно быстро и с хорошей точностью, что подтверждается малой разницей результатов расчета при сравнении их друг с другом. Необходимо отметить, что при утяжелении режима результаты расчета и скорости сходимости итерационных процессов при использовании того или иного метода существенно различаются, а при приближении к критическому режиму разница может достигать 10 % и более, что видно из таблицы 1. Также не мало важным является то, что при значительном утяжелении режима потери мощности имеют тот же порядок что и мощности нагрузок в узлах, и их влияние заметно отражается на самих значениях потерь. Так, увеличив все мощности узлов в 3 раза, мы в результате расчета должны были получить увеличение потерь примерно в 9 раз, так как зависимость потерь мощности от мощности, протекающей по участку квадратичная. А по результатам представленным в таблице 1 мы получили увеличение потерь в среднем по методам равное 13. Это дает возможность говорить, что при утяжеленных и особенно тяжелых режимах потери мощности на ветвях оказывают значительное влияние на протекающие по ним потоки. Чтобы уменьшить потери при таких режимах можно увеличить номинальное напряжение или увеличить пропускную способность линии путем замены проводов.

Исходя из полученных результатов, более подходящими для расчета и анализа режимов работы электрической сети являются метод с применением матрицы обобщенных параметров и метод Ньютона, это мотивировано тем что эти методы довольно быстро (за сравнительно небольшое число итераций) позволяют произвести расчет и также имеют довольно большую глубину расчета. Методы расчета по узловым и обращенным узловым уравнениям по этим параметрам значительно уступают, особенно в скорости расчета. Но они также имеют свои преимущества – это простота реализации, то есть для проведения расчета нам просто необходимо подставить значения в  $n$  выражений необходимое число раз ( $n$  – число узлов схемы). Эти методы доступны и могут использоваться в учебных целях для ознакомления, разбора принципов работы и программирования итерационных методов.

**Таблица 1. Результаты расчетов по различным итерационным методам**

	С применением матриц обобщенных параметров.	Метод узловых уравнений	Метод обращенных узловых уравнений	Расчет режима методом Ньютона
Схема 1				
Коэффициент утяжеления (суммарная нагрузка, МВт)	1 (108)			
Количество итерации	2	4	4	3
Потери мощности	6,37	6,394	6,394	6,382
Наименьшее узловое напряжение	111,537	111,521	111,521	111,529
Наибольшее узловое напряжение	118,303	118,298	118,298	118,301
Коэффициент утяжеления (суммарная нагрузка, МВт)	3 (324)			
Количество итерации	4	8	7	7
Потери мощности	88,493	87,366	87,371	86,952
Наименьшее узловое напряжение	86,201	88,27	88,269	88,349
Наибольшее узловое напряжение	112,774	112,699	112,699	112,725
Коэффициент утяжеления (суммарная нагрузка, МВт)	4,037 (435,996)			
Количество итерации	12	91	81	26
Потери мощности	300,401	341,761	342,363	317,59
Наименьшее узловое напряжение	60,198	56,008	55,95	58,424
Наибольшее узловое напряжение	104,274	102,849	102,829	103,669
Предельный коэффициент утяжеления	4,063	4,037	4,037	4,047
Схема 2				
Коэффициент утяжеления (суммарная нагрузка)	1 (97,2)			
Количество итерации	2	3	3	3
Потери мощности	3,251	3,253	3,253	3,253
Наименьшее узловое напряжение	115,3	115,299	115,299	115,3
Наибольшее узловое напряжение	118,288	118,289	118,289	118,289
Коэффициент утяжеления (суммарная нагрузка, МВт)	3 (291,6)			
Количество итерации	3	6	6	6
Потери мощности	38,225	38,71	38,71	38,638
Наименьшее узловое напряжение	101,067	100,926	100,926	100,947
Наибольшее узловое напряжение	111,304	111,227	111,226	111,238
Коэффициент утяжеления (суммарная нагрузка, МВт)	5,1 (495,72)			
Количество итерации	11	37	36	22
Потери мощности	240,895	256,585	256,604	249,973
Наименьшее узловое напряжение	68,754	66,925	66,922	67,687
Наибольшее узловое напряжение	94,312	93,29	93,288	93,715
Предельный коэффициент утяжеления (суммарная нагрузка)	5,162	5,129	5,129	5,14

В методе Ньютона необходимо отметить, его несложную реализацию и довольно быструю сходимость относительно методов простой и ускоренной итерации при решении узловых уравнений. Именно сочетание этих качеств обуславливает, то что на базе именно этого метода работают современные программы расчета электрических сетей.

Остановимся подробнее на методе расчета с помощью матрицы обобщенных параметров. Данный метод, исходя из наших исследований, является наиболее быстродействующим из всех рассмотренных в данной работе. Он базируется на следующем матричном уравнении (1), позволяющем найти матрицу  $C$  (матрицу обобщенных параметров):

$$C = dZ_B^{-1} M_{\alpha\beta}^T Y_Y^{-1}, \quad (1)$$

где  $dZ_B$  – диагональная матрица сопротивлений;

$M_{\alpha\beta}$  – первая матрица инцидентности без балансирующего узла;

$Y_Y$  – матрица узловых проводимостей.

На первый взгляд нахождение матрицы  $C$  не вызывает особых затруднений, но обращение матрицы  $Y_Y$  связано с серьезными трудностями, если учесть тот факт, что ее элементы в общем случае являются комплексными величинами. Данную операцию для схем достаточно большой размерности даже современные компьютеры будут выполнять довольно долгое время, поэтому при написании промышленных программ эту операцию стараются обходить или упрощать, используя различные более сложные алгоритмы обращения матриц. Также некоторое неудобство связано с хранением первой матрицы инцидентности и обратной ей, что связано с большим количеством нулевых элементов.

Еще одним методом нахождения матрицы  $C$  является последовательный расчет  $n$ -ого числа режимов, при задании некоторого единичного тока последовательно в каждом из узлов схемы. Таким образом, мы при каждом расчете режима получаем одну строку искомой матрицы, находя частичные токи в каждой ветви схемы. Но для такого расчета нам также необходима программа расчета режима. Отсюда можно заключить, что данный метод упирается в нахождение матрицы  $C$ .

Следует также отметить, что матрица коэффициентов распределения посчитанная для данной схемы один раз может использоваться для анализа работы данной схемы при различных параметрах узлов (нагрузках, напряжениях). Этот вывод вытекает из получения данной матрицы, которая как видно из формулы не зависит от параметров узлов и потоков мощностей на участках, а зависит только от конфигурации сети и сопротивлений ее элементов.

### Литература

1. Шиманская, Т.А. Методическое пособие к курсовой работе по дисциплине «Математические задачи энергетики». – Минск: БНТУ, 2004.
2. Поспелов, Г.Е., Федин, В.Т., Лычев, П.В. Электрические системы и сети. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 720 с.

УДК 621.3

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ МЕЖСИСТЕМНЫМИ ПЕРЕТОКАМИ С ПОМОЩЬЮ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ, УСТАНОВЛИВАЕМЫХ В БЕЛОРУССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

*Лагун Н.А.*

Научный руководитель – **МЫШКОВЕЦ Е.В.**

В настоящее время Республика Беларусь не обладает достаточным количеством топливно-энергетических ресурсов и вынуждена значительную их часть покупать у сопредельных государств. При этом важнейшим направлением государственной политики и экономики является экономное потребление энергоресурсов и требование обеспечения энергетической безопасности страны, под которой понимают комплекс условий,