УДК 621.398

МЕТОД СИНТЕЗА ТОПОЛОГИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫХ ОЦЕНОК

Б.Н.АБРАМОВИЧ, *д-р техн. наук*, *профессор*, *babramov@mail.ru*
С.В.БАБУРИН, *канд. техн. наук*, *доцент*, *s-baburin@yandex.ru*
Санкт-Петербургский горный университет, *Россия*

Предложен метод синтеза топологии систем электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса. Обоснована целесообразность использования общего логико-вероятностного метода и разработанного на его основе программного комплекса «АРБИТР» для расчета надежности систем электроснабжения. Приведены результаты синтеза топологии систем электроснабжения на примере потребителей с подземными горными работами и потребителей газотранспортных систем. Даны рекомендации по повышению надежности электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса.

Ключевые слова: надежность, система электроснабжения, логико-вероятностный метод, значимость, автономный источник.

Основным видом энергии, используемой в технологических процессах добычи, переработки и транспортировки твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых, является электрическая энергия. Системы электроснабжения (СЭС) объектов минерально-сырьевого комплекса (МСК) должны обеспечивать потребителей электроэнергией с заданным уровнем надежности, которая определяется в первую очередь следующими показателями: вероятностью безотказной работы за заданный период времени, коэффициентами готовности, глубиной и длительностью провалов напряжения. При нарушении электроснабжения возникают проблемы, связанные с расстройством сложных технологических процессов, приводящим к значительным материальным ущербам, возникновением опасности для жизни людей и т.д. Анализ топологии систем электроснабжения позволил выявить обобщенную структуру комплекса электроснабжения предприятий МСК, включающую устройства повышения надежности электроснабжения: источники автономного электроснабжения (ИАЭ); автоматические пункты секционирования (АПС); фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ); быстродействующий автоматический ввод резерва (БАВР); устройства регулирования напряжения под нагрузкой силовых трансформаторов (рис.1).

На рис.1 не показано электроснабжение шин 6(10) кВ от систем централизованного электроснабжения 35, 110 и 220 кВ через понижающие трансформаторы главных понизительных подстанций, а также множество потребителей и преобразователей электроэнергии, получающих питание от сборных шин посредством радиальных, радиально-магистральных и кольцевых линий электропередачи.

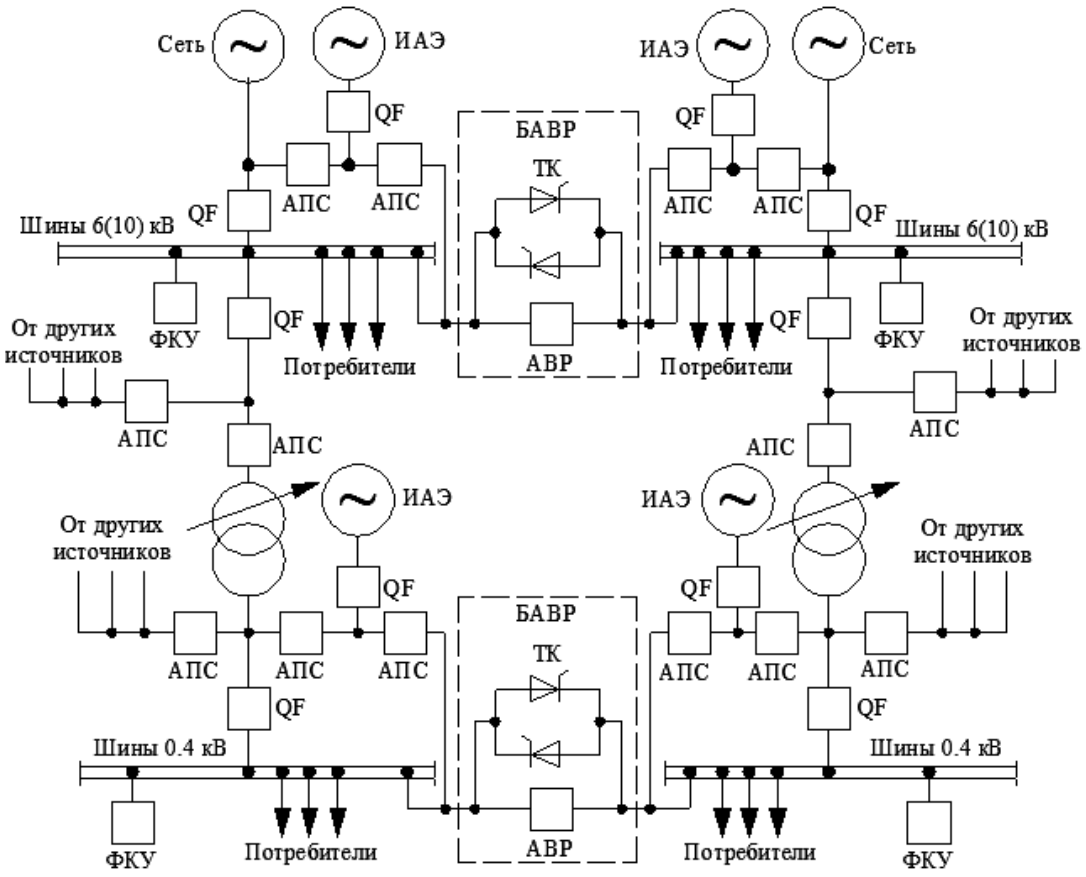


Рис.1. Обобщенная структура системы электроснабжения предприятий МСК
QF – автоматический выключатель; ТК – тиристорный коммутатор

В условиях систем централизованного электроснабжения, сети которых имеют замкнутую структуру, глубокие провалы напряжения при аварийных режимах возникают на всех вводах, что не позволяет считать их независимыми источниками [2].

Согласно энергетической стратегии России на период до 2030 г., утвержденной распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р, необходимо повысить вероятность бездефицитной работы энергосистем России с 0,996 до 0,9997, что соответствует уменьшению допустимого числа часов отключения в год с 72 до 36, включая время восстановления электроснабжения [4].

Директивные материалы, устанавливающие требования к показателям надежности СЭС и устойчивости технологических процессов при нарушениях электроснабжения, отсутствуют, что обуславливает необходимость проведения работ по установлению граничных параметров, которые должны быть обеспечены на объектах МСК. Согласно ГОСТ Р 54149-2010 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», пункт 4.3.2.1 «Провалы напряжения» длительность провала напряжения может изменяться от 10 мс до 1 мин. Однако данный ГОСТ не предъявляет требований к глубине и длительности провала напряжения в электрических сетях для конкретных технологических процессов на предприятиях МСК.

Как показали исследования и опыт эксплуатации действующих систем электроснабжения, нарушения технологических процессов в нефтедобывающей промышленности возникают при провалах напряжения длительностью 0,1 с. В условиях нефтехимической промышленности в аварийных режимах, возникающих при коротком замыкании (к.з.) на одном из вводов и приводящих к провалу напряжения до 0,3 от номинального и длительно-

стью ликвидации процесса к.з. 0,18 с, имело место нарушение процесса нефтепереработки, приведшее к отключению 40 технологических установок с соответствующим материальным ущербом. Аналогичные ущербы при нарушении электроснабжения имеют место практически во всех отраслях горного производства.

Учитывая многообразие производств в МСК, необходимо установить показатели надежности электроснабжения, при которых обеспечивается устойчивость технологических процессов, и разработать метод синтеза топологии систем электроснабжения предприятий МСК, свойства и параметры которых удовлетворяют требованиям устойчивости и безопасности эксплуатации технологических объектов МСК.

Обоснование структуры и параметров топологии СЭС целесообразно проводить с использованием методов математического моделирования, в процессе которого для вариативных структур должны определяться показатели надежности, количество и значимость отдельных элементов. Рассмотрим возможность использования известных методов оценки надежности СЭС МСК с учетом их сложности и многосвязности.

При моделировании целесообразно применять автоматизированные программные комплексы. В настоящее время используются следующие программные комплексы: «Risk Spectrum»; комплекс В.А.Проурзина численного анализа надежности и риска на основе деревьев отказов; «BUNKER»; «RAY»; «Ризикон-Надежность»; «АРБИТР».

В большинстве приведенных программных комплексов исследуемые структуры представляются в виде деревьев событий, деревьев отказов или графов связности. Однако такое представление событий имеет ряд недостатков:

• представление структурных схем в виде деревьев событий делает возможным корректно представить только монотонные процессы функционирования систем, что не позволяет учесть в моделях возможную сложность проектируемых объектов;

• построение деревьев отказов требует учета всех возможных вариантов событий, последовательностей и комбинаций, что при рассмотрении сложных, взаимосвязанных систем представляется затруднительным.

Перечисленные недостатки устранены в программном комплексе автоматизированного структурно-логического моделирования систем «АРБИТР» [1]. В данном методе в качестве исходной структурной схемы используются схемы функциональной целостности (СФЦ), отображающие исходную систему электроснабжения и состоящие из входящих в их состав элементов. СФЦ представляет собой структурную схему, на которой функциональными вершинами (большие кружки) обозначены элементы реальной системы электроснабжения. Они соединяются конъюнктивными и дизъюнктивными дугами, характеризующими логическую взаимосвязь элементов системы. Для каждого элемента задаются его параметры.

В качестве примеров рассмотрим две схемы функциональной целостности обобщенной системы электроснабжения: компрессорной станции «Торжокская» магистрального газопровода «Газпромтрансгаз Санкт-Петербург» (рис.2) и шахты «Воргашорская» АО «Воркутауголь» (рис.3).

Исходными данными для расчета являются значения средней наработки на отказ и среднего времени восстановления каждого элемента. Они определяются на основе статистических или справочных [8] данных. После этого задается логический критерий функционирования, например вероятность получения питания какими-либо потребителями системы, и определяется логическая функция работоспособности системы.

В результате моделирования рассчитываются показатели надежности системы электроснабжения, такие как коэффициент готовности, наработка на отказ, среднее время восстановления системы, вероятность безотказной работы за определенный промежуток времени и показатели, характеризующие роль элементов в обеспечении надежности. К таким показателям относятся значимость, положительный и отрицательный вклады каждого элемента [5].

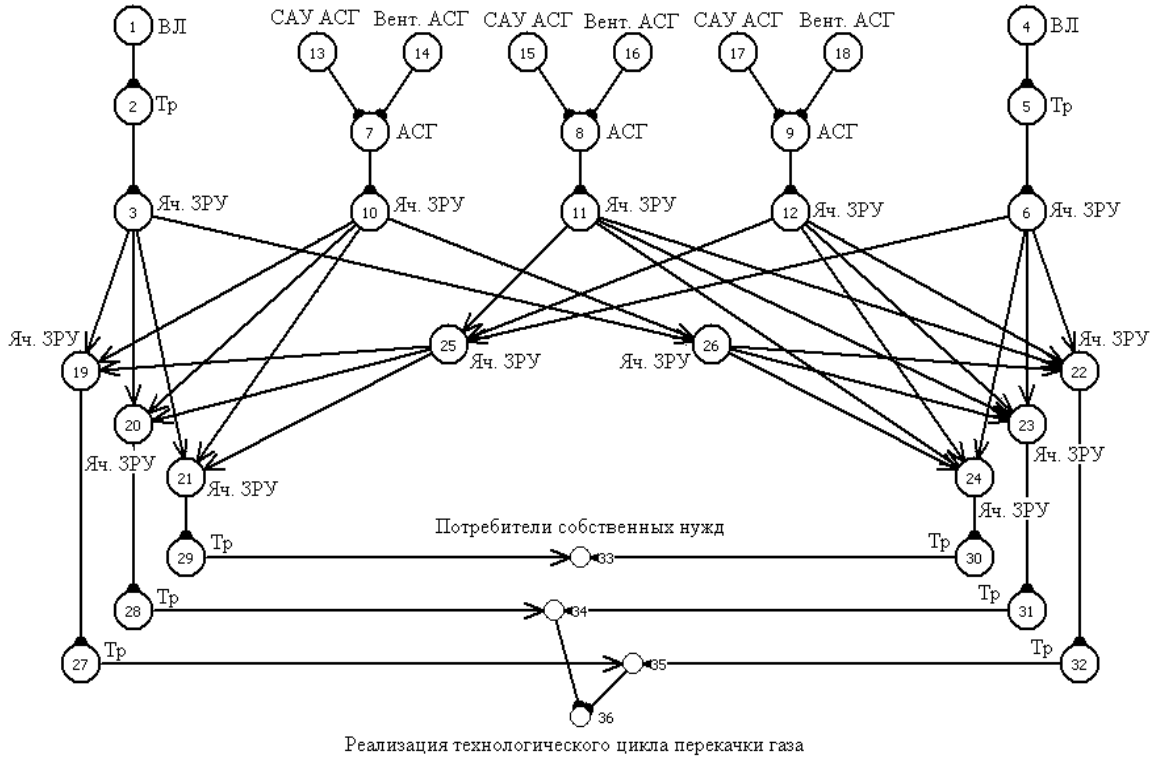


Рис.2. Схема функциональной целостности работоспособности системы электроснабжения компрессорной станции

1, 4 – воздушная линия электропередачи 110 кВ (ВЛ); 2, 5 – трансформаторы 110/10 кВ (Тр); 3, 6, 10-12, 19-26 – ячейки закрытого распределительного устройства 10 кВ (Яч. ЗРУ); 7-9 – автоматизированная станция газопоршневая (АСГ); 13,15,17 – система автоматического управления (САУ) АСГ; 14, 16, 18 – блок вентиляции АСГ; 27-32 – трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ; 33-36 – системные функции

Значимость элемента показывает увеличение надежности системы при повышении вероятности безотказной работы элемента от нуля до единицы, т.е. это максимально возможное улучшение:

$$\xi_i = P_c\big|_{p_i=1} - P_c\big|_{p_i=0} .$$

В реальности существующие элементы уже обладают вероятностью безотказной работы отличной от нуля (p_i). Поэтому целесообразнее при анализе использовать значения положительных вкладов элементов. Они представляют собой возможное увеличение надежности системы при повышении вероятности безотказной работы элемента с текущего значения до единицы, т.е. это реальные возможности по улучшению надежности:

$$\beta_i^+ = P_c\big|_{p_i=1} - P_c\big|_{p_i} .$$

Отрицательный вклад, наоборот, показывает, насколько уменьшится надежность системы при уменьшении вероятности безотказной работы элемента с текущего значения до нуля, т.е. показывает наиболее уязвимые элементы, от потери которых наиболее пострадает надежность системы:

$$\beta_i^- = P_c\big|_{p_i} - P_c\big|_{p_i=0} .$$

В результате моделирования надежности электроснабжения шахтных потребителей установлены показатели надежности электроснабжения для электродвигателей ленточного конвейера, а также угольного комбайна и скребкового конвейера в лаве. На рис.3 они обозначены фиктивными (маленькими) вершинами 74, 80 и 85 соответственно.

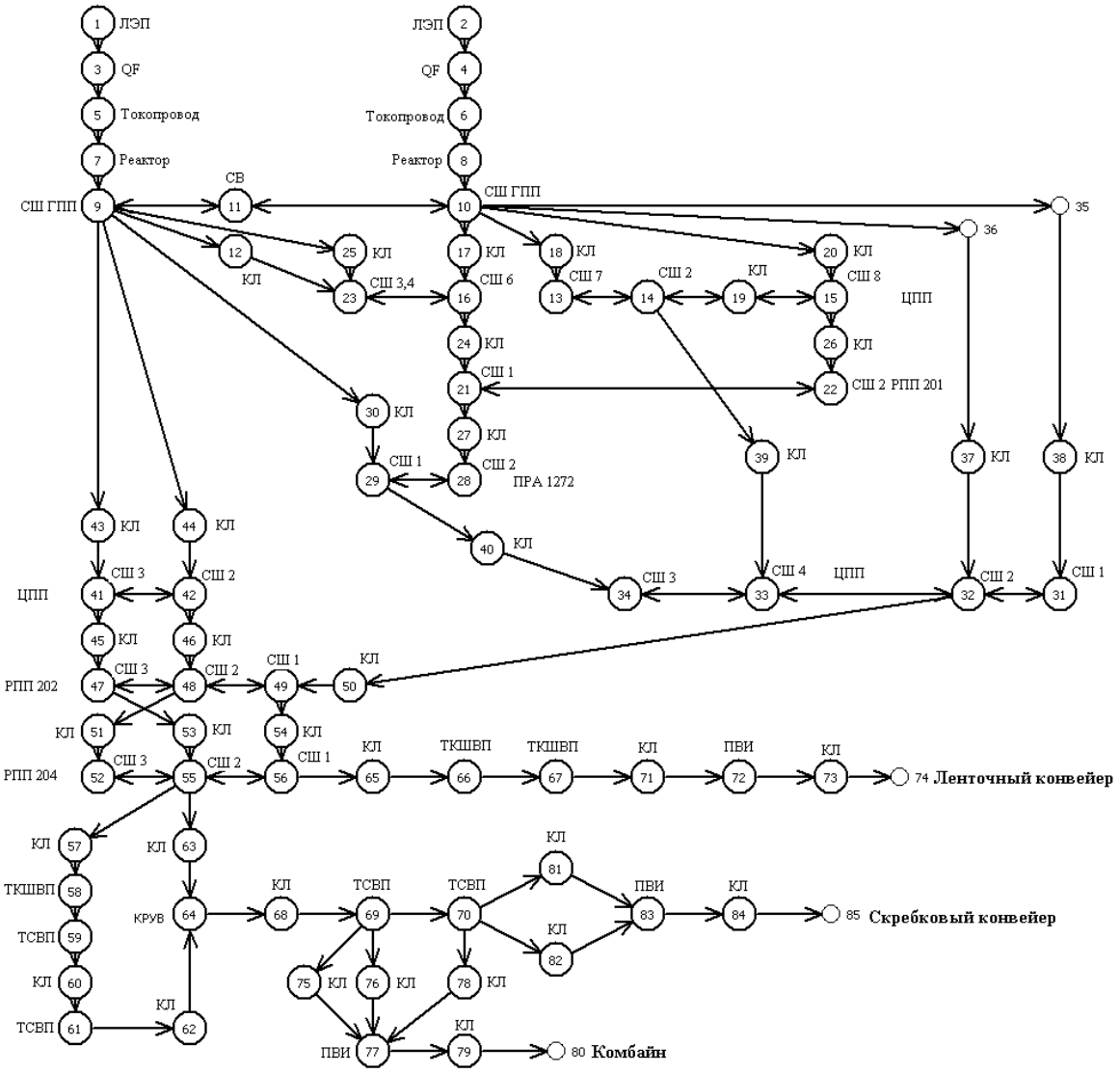


Рис.3. Схема функциональной целостности системы электроснабжения шахтных потребителей

1, 2 – линия электропередачи (ЛЭП); 3, 4 – автоматический выключатель (QF); 9, 10 – секция сборных шин (СШ) главной понизительной подстанции (ГПП); 11 – секционный выключатель (СВ); 13-16, 19, 21-23, 28, 29, 31-34, 41, 42, 47-49, 52, 55, 56 – секция сборных шин (СШ) распределительных пунктов (РПП, ПРА) и центральных трансформаторных подстанций (ЦПП); 12, 17, 18, 20, 24-27, 30, 37-40, 43-46, 50, 51, 53, 54, 57, 60, 62, 63, 65, 68, 71, 73, 75, 76, 78, 79, 81, 82, 84 – кабельная линия (КЛ); 58, 59, 61, 66, 67, 69, 70 – передвижные трансформаторные подстанции (ТСВП, ТКШВП); 64 – комплектное распределительное устройство (КРУВ); 72, 77, 83 – пускатель (ПВИ)

Результаты расчетов показали, что для элемента 74 (ленточный конвейер) коэффициент готовности системы $K_г = 0{,}993$, а для элементов 80 (комбайн) и 85 (лавный конвейер) – $K_г = 0{,}987$. Однако при установленных значениях коэффициента готовности для электроснабжения ленточного конвейера средняя наработка системы на отказ $T_0 = 1391$ ч, для лавового скребкового конвейера $T_0 = 472$ ч. Средняя частота отказов в год составила соответственно 6,3 и 18,5. При этом для ленточного конвейера вероятность безотказной работы за один год $P = 0{,}0018$, для лавного конвейера и комбайна – $P = 10^{-8}$.

В результате моделирования получены величины значимостей, отрицательных и положительных вкладов элементов системы. При этом значения положительных вкладов составляют от 0 до 0,0029 и отрицательных – от 0 до 0,99306. Элементы, обладающие наибольшими значениями положительных и отрицательных вкладов для СФЦ на рис.3, показаны в таблице. Из полученных результатов можно выявить элементы, выход из строя ко-

торых приведет к наибольшим экономическим ущербам. Для рассматриваемой схемы это кабельные линии, трансформаторные подстанции и коммутационные аппараты. При этом данные элементы также обладают наибольшими значениями положительных вкладов.

Значимости, положительные и отрицательные вклады элементов

Номер элемента	Значимость	Отрицательный вклад	Положительный вклад	Название элемента
49	0,0002279	–0,00022787	2,6561E-008	СШ 1 РПП 202
54	0,00013332	–0,00013279	5,2466E-007	КЛ 6 кВ
55	0,0040238	–0,0040234	4,6896E-007	СШ 2 РПП 204
56	0,99318	–0,99306	0,00011575	СШ 1 РПП 204
65	0,99365	–0,99306	0,00058892	КЛ 6 кВ
66	0,99596	–0,99306	0,0029	ТКШВП
67	0,99596	–0,99306	0,0029	ТКШВП
71	0,99322	–0,99306	0,00015088	КЛ 1,2 кВ
72	0,9932	–0,99306	0,00013247	ПВИ
73	0,9932	–0,99306	0,0001308	КЛ 1,2 кВ

Результаты моделирования надежности компрессорной станции (см. рис.2) [6] показали, что наибольшую значимость имеют ячейки ЗРУ 19, 20, 22, 23, 28, 29, 31, 32 и трансформаторы комплектных трансформаторных подстанций 3, 6, 17, 18. При этом значения положительных вкладов составляют от 0 до 0,002, отрицательных – от 0 до 0,035.

Анализ положительных вкладов элементов систем электроснабжения предприятий МСК показал, что их значения не превышают 0,003. Таким образом, увеличение вероятности безотказной работы систем электроснабжения посредством модернизации отдельных ее элементов возможно только на величину, равную положительному вкладу этого элемента. Поэтому обеспечение требуемых показателей надежности целесообразно проводить посредством структурного и временного резервирования на основе синтеза топологии систем электроснабжения предприятий МСК. К числу таких мер можно отнести следующие:

• резервирование наиболее важных элементов системы;

• применение дополнительных источников электрической энергии, в роли которых могут выступать традиционные автономные источники, работающие на дизельном топливе или природном газе, а также альтернативные и возобновляемые источники энергии;

• использование быстродействующего автоматического ввода резерва [3];

• применение накопителей в системе, позволяющих создавать некоторый запас времени для устранения отказов [9]. Это наиболее распространено в транспортных системах и достигается за счет устройства, например, промежуточных накопителей. Источники бесперебойного питания для наиболее требовательных к перерывам электроснабжения потребителей позволяют создать резерв по времени, необходимый для восстановления питания от основного источника.

Результаты логико-вероятностного моделирования являются основой при синтезе топологии систем электроснабжения предприятий МСК с целью определения оптимального варианта системы электроснабжения и реконструкции существующих систем промышленных предприятий [7]. Такой алгоритм синтеза показан на рис.4. В алгоритм также включен выбор варианта системы электроснабжения по экономическому критерию. В качестве экономического критерия может быть принят уровень приведенных затрат или размер чистого дисконтированного дохода.

Нередки случаи, когда система обладает структурной избыточностью. В таких системах, возможно, существуют элементы, которые можно исключить без снижения надежности. В каких-то случаях вместо наиболее уязвимых элементов можно использовать другие. Так, например, проведенные исследования для газоперекачивающих компрессор-

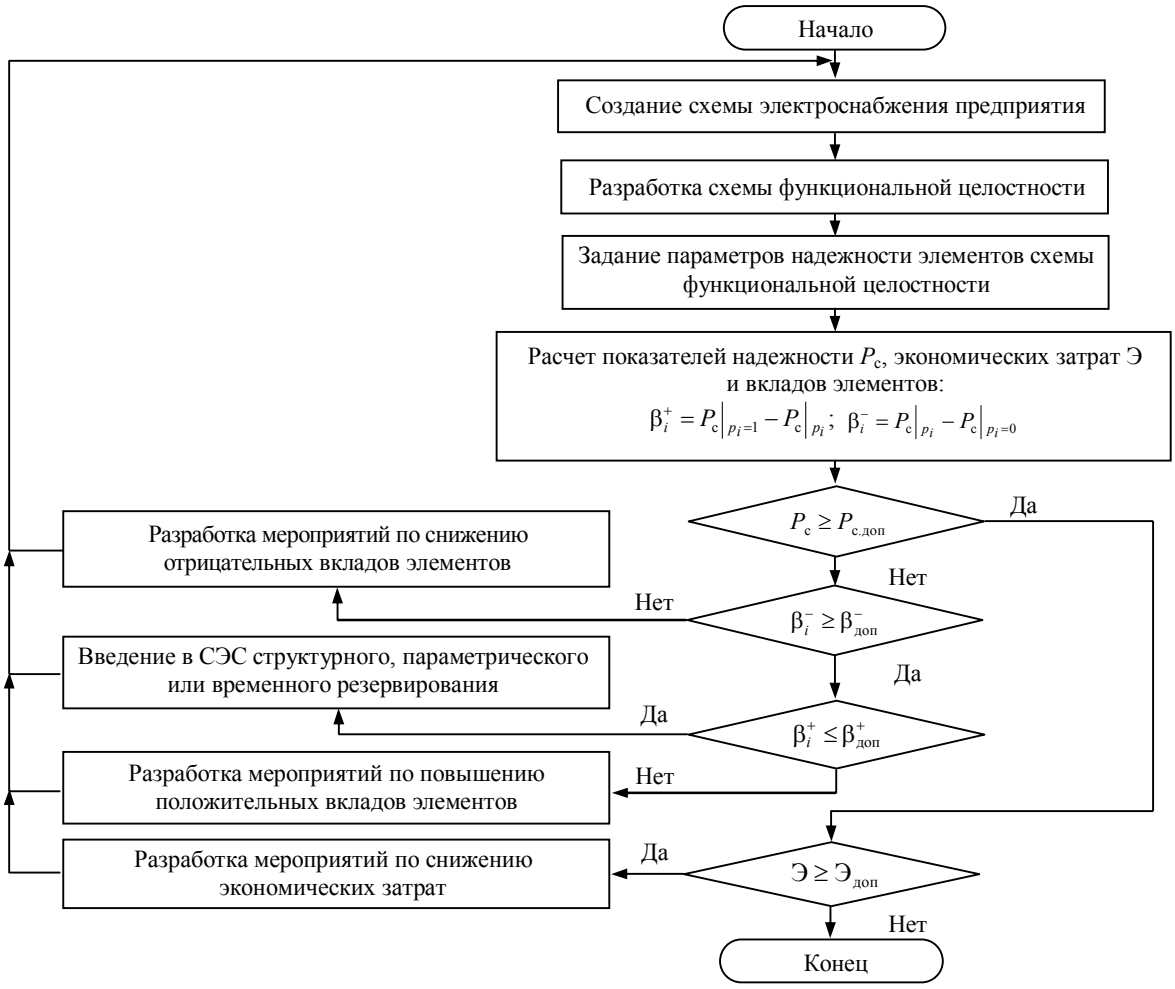


Рис.4. Алгоритм синтеза топологии систем электроснабжения предприятий МСК

ных станций с использованием логико-вероятностного моделирования показали, что вариант схемы электроснабжения компрессорной станции с двухсекционным ЗРУ и односекционными комплектными трансформаторными подстанциями (с одним трансформатором) является более предпочтительным по сравнению с традиционной схемой с двумя трансформаторами, так как при этом существенно снижаются издержки на создание и эксплуатацию системы электроснабжения компрессорной станции, а надежность удовлетворяет требованиям нормативных документов. Также было выявлено, что сравнительные показатели по надежности автономных электростанций и линий электропередачи внешней сети отличаются на несущественную величину – 0,1 %. Следовательно, создана равноценная система электроснабжения с использованием местных источников питания, по надежности не уступающая питанию от централизованной энергосистемы.

Выводы

1. Обоснована целесообразность использования общего логико-вероятностного метода и разработанного на его основе программного комплекса «АРБИТР». Логико-вероятностное моделирование позволяет определить показатели значимостей и вкладов элементов системы.

2. Предложен метод синтеза топологии систем электроснабжения предприятий МСК, свойства и параметры которых удовлетворяют требованиям устойчивости и надежности с учетом сложности и многосвязности составляющих компонентов, позволяющий на основе выявленных показателей значимостей и вкладов элементов системы выбрать пути оптимизации системы электроснабжения промышленных предприятий, позволяющие минимизировать количество элементов и снизить капитальные и эксплуатационные затраты.

3. Для электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса необходимо использовать систему с распределенной генерацией от автономных источников питания, что позволит полностью или частично отказаться от централизованного электроснабжения установок МСК без снижения надежности системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. АРБИТР. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0. Автор: А.С.Можаев. Правообладатель: АО «СПИК СЗМА». Свидетельство № 2003611101 от 12 мая 2003 г. об официальной регистрации программ. Роспатент РФ, Москва, 2003. Аттестационный паспорт ПС № 222 от 21 февраля 2006 г. Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) РФ.

2. *Ершов М.С.* Методы оценки надежности и независимости источников питания в системах промышленного электроснабжения / М.С.Ершов, А.В.Егоров, В.А.Анциферов // Промышленная энергетика. 2014. № 1. С.2-6.

3. Минимизация ущерба при добыче нефти из-за кратковременных перерывов электроснабжения / Э.Х.Муратбакеев, Б.Н.Абрамович, А.В.Медведев, В.В.Старостин // Промышленная энергетика. 2009. № 7. С.25-28.

4. *Овсейчук В.А.* Надежность и качество электроснабжения потребителей // Новости электротехники. 2013. № 3. С.50-53.

5. *Петров С.П.* Применение логико-вероятностного метода моделирования для расчета надежности систем электроснабжения / С.П.Петров, С.В.Бабурин, Д.А.Устинов // Наука и техника в газовой промышленности. 2011. № 3. С.47-50.

6. *Петров С.П.* Определение направлений оптимизации энергетических структур по критерию надежности / С.П.Петров, Б.Н.Абрамович, С.В.Бабурин // Газовая промышленность. 2011. № 9. С.82-84.

7. *Петров С.П.* Повышение надежности объектов газотранспортных систем с использованием логико-вероятностного метода / С.П.Петров, А.Н.Махалин, С.В.Бабурин // Записки Горного института. 2012. Т.196. С.261-265.

8. РД 34.20.574. Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками. М.: СПО Союзтехэнерго, 1985. 20 с.

9. *Шпиганович А.Н.* Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения / А.Н.Шпиганович, В.А.Пестунов. Елец: ЕГУ им. И.А.Бунина, Липецк: ЛГТУ, 2004. 281 с.

REFERENCES

1. ARBITR. Programmnyi kompleks avtomatizirovannogo strukturno-logicheskogo modelirovaniya i rascheta nadezhnosti i bezopasnosti ASUTP na stadii proektirovaniya (PK ASM SZMA) (*Software for automated structural logic simulation and calculation of reliability, security and process control systems at the design stage*), bazovaya versiya 1.0. Avtor: A.S.Mozhaev. Pravoobladatel': AO «SPIK SZMA». Svidetel'stvo № 2003611101 ot 12 maya 2003 g. ob ofitsial'noi registratsii programm. Rospatent RF, Moskva, 2003. Attestatsionnyi pasport PS № 222 ot 21 fevralya 2006 g. Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru (Rostekhnadzor) RF.

2. *Ershov M.S., Egorov A.V., Antsiferov V.A.* Metody otsenki nadezhnosti i nezavisimosti istochnikov pitaniya v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya (*Methods for assessing the reliability and independence of supply sources in industrial power systems*). Promyshlennaya energetika. 2014. N 1, p.2-6.

3. *Muratbakeev E.Kh., Abramovich B.N., Medvedev A.V., Starostin V.V.* Minimizatsiya ushcherba pri dobyche nefti iz-za kratkovremennykh pereryvov elektrosnabzheniya (*Minimizing the damage caused by oil due to short interruptions of power supply*). Promyshlennaya energetika. 2009. N 7, p.25-28.

4. *Ovseichuk V.A.* Nadezhnost' i kachestvo elektrosnabzheniya potrebitelei (*The reliability and quality of electricity supply to consumers*). Novosti elektrotekhniki. 2013. N 3, p.50-53.

5. *Petrov S.P., Baburin S.V., Ustinov D.A.* Primenenie logiko-veroyatnostnogo metoda modelirovaniya dlya rascheta nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya (*The use of logic and probabilistic modeling method for calculating the reliability of power supply systems*). Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti. 2011. N 3, p.47-50.

6. *Petrov S.P., Abramovich B.N., Baburin S.V.* Opredelenie napravlenii optimizatsii energeticheskikh struktur po kriteriyu nadezhnosti (*Identification of optimization directions of energy structure on the criterion of reliability*). Gazovaya promyshlennost'. 2011. N 9, p.82-84.

7. *Petrov S.P.*, *Makhalin A.N.*, *Baburin S.V.* Povyshenie nadezhnosti ob"ektov gazotransportnykh sistem s ispol'zovaniem logiko-veroyatnostnogo metoda (*Improving the reliability of gas transport systems with the use logic and probabilistic modeling method*). Zapiski Gornogo instituta. 2012. Vol.196, p.261-265.

8. RD 34.20.574. Ukazaniya po primeneniyu pokazatelei nadezhnosti elementov energosistem i raboty energo-blokov s paroturbinnymi ustanovkami (*Guidelines on the application of power systems elements reliability parameters and work units with steam turbine installations*). Moscow: SPO Soyuztekhenergo, 1985, p.20.

9. *Shpiganovich A.N.*, *Pestunov V.A.* Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya sistem elektrosnabzheniya (*Improving the efficiency of functioning of the power supply systems*). Elets: EGU im. I.A.Bunina, Lipetsk: LGTU, 2004, p.281.

THE METHOD FOR SYNTHESIS OF POWER SUPPLY SYSTEM TOPOLOGY OF MINERAL RESOURCES ENTERPRISES ON THE BASIS OF LOGICAL AND PROBABILISTIC ASSESSMENTS

B.N.ABRAMOVICH, *Dr. of Engineering Sciences*, *Professor*, *babramov@mail.ru*
S.V.BABURIN, *PhD in Engineering Sciences*, *Associate Professor*, *s-baburin@yandex.ru*
Saint-Petersburg Mining University, *Russia*

A method for the synthesis of the power supply system topology of mineral resources enterprises. The expediency of using general logic probabilistic method and developed on the its basis software «ARBITR» to calculate the reliability of power supply systems. The synthesis results of power supply system topology on the example of underground mining and gas transmission systems consumers. Recommendations to improve the power supply reliability of mineral resources enterprises.

***Key words*:** reliability, power supply system, the logical-probabilistic method, significance, autonomous source.