

**ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ
ОБОРУДОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ И
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ****Т.В. Насибуллина, Д.А. Мигов (Новосибирск)**

Современным подходом к проектированию сложных систем является моделирование. Цифровые модели используют для имитации полного жизненного цикла отдельных узлов и систем в целом. Особенно актуально создание цифровых моделей систем безопасности и АСУТП, предназначенных для эксплуатации на опасных производственных объектах (ОПО), таких как угольные шахты. Такие модели становятся базой для цифровых двойников промышленных предприятий. Самой распространенной причиной аварий на ОПО является человеческий фактор. Поэтому во многом безопасная работа ОПО связана с уровнем автоматизации на объекте. Законами Российской Федерации [1], федеральными нормами и правилами [2], а также государственными стандартами [3, 4] устанавливаются требования к МСБ и УТП горнодобывающих предприятий. Актуальным подходом к построению таких систем является применение единой подземной сети передачи данных, а ее работоспособность напрямую зависит от подачи электроэнергии и наличия резервных аккумуляторных источников питания. Промышленные предприятия стараются минимизировать затраты и оптимизировать количество эксплуатируемого оборудования, поэтому оборудование систем безопасности и систем управления технологическими процессами часто имеет общие точки подключения к сети энергоснабжения. При этом резервирование линий питания выполняется не всегда должным образом. Так, применяемая на практике цифровая модель МСБ и УТП не может быть построена без учета работы сети энергоснабжения. В данной статье рассмотрены практические аспекты моделирования сети энергоснабжения оборудования МСБ и УТП на примере системы «Умная шахта®» производства ООО НПФ «Гранч», г. Новосибирск. Рассмотренные методы могут быть применены также к МСБ и УТП других производителей.

Описание системы

При построении сети энергоснабжения шахты руководствуются правилами, изложенными в [5]. На угольных шахтах используется однолинейная система распределения энергии. Поскольку на ОПО должно приходиться две независимых линии питания, на каждой шахте имеется две независимые энергоподстанции. К ним подключены различные комплексы горно-шахтного оборудования (очистные и проходческие комплексы, буровые установки, насосы, др.) и подземная осветительная сеть. От осветительной сети получает питание и оборудование МСБ и УТП. Структура сети энергоснабжения системы «Умная шахта» иерархическая: к автоматам осветительным шахтным (АОШ) подключаются контроллеры питания (КП), которые преобразуют искробезопасное переменное напряжение 127 В в искробезопасное постоянное напряжение 60 В для питания основных элементов системы – базовых станций (БС). Рекомендовано при проектировании закладывать резервирование питания путем подключения каждого КП одновременно к двум независимым (запитанным от разных энергоподстанций или ячеек) АОШ.

В случае возникновения аварии самым повреждаемым элементом сети энергоснабжения оказываются кабельные линии (механический разрыв, воздействие пожара и др.). Поэтому в системе предусмотрен дополнительный резерв: в БС имеются аккумуляторы, позволяющие продолжать работу в течение 20 часов, пока авария не будет устранена. Резервирование отдельными аккумуляторными блоками, не совмещенными с оборудованием МСБ и УТП, по большому счету не имеет смысла, так как при разрушении кабельных линий они не смогут служить для восстановления работы системы. Мощность, передаваемая по искробезопасной линии от КП к БС, ограничена [6], поэтому для полного заряда аккумулятора может потребоваться до нескольких суток (в зависимости от начального уровня заряда, режимов работы БС, удаленности от КП и качества кабельной линии). При моделировании жизненного цикла системы важно учитывать данные обстоятельства.

Обстановка в шахте (производимые на участках технологические операции, применяемое оборудование, концентрация опасных и вредных веществ в атмосфере и многие другие параметры) динамична даже в штатном режиме функционирования, можно сравнить шахту с живым организмом. Вместе с обстановкой меняется состав и конфигурация оборудования МСБ и УТП, а как следствие и сети энергоснабжения системы. При проверках функционирования систем автоматики может происходить отключение высоковольтных ячеек, приводящее к отключению АОШ. Как было отмечено выше, резервирование линии энергоснабжения на этом уровне может отсутствовать по разным причинам, а к АОШ могут быть подключены в том числе и устройства из состава МСБ и УТП.

Выбор подхода и инструментальных средств

С учетом ранее описанных фактов задача моделирования сети энергоснабжения МСБ и УТП сводится к оценке живучести сети и ее стоимости на различных этапах жизненного цикла системы. Важно учитывать следующие группы параметров сети энергоснабжения:

- пространственное расположение узлов и протяженность кабельных линий;
- резервирование (аккумуляторы, независимые подстанции, резерв кабельных линий);
- стабильность электрических параметров линии;
- нагрузочная способность линии;
- стоимость развертывания, обслуживания и модернизации сети.

Пренебрегая частью параметров, можно использовать среды моделирования, предназначенные для моделирования электрических схем, например, MATLAB+Simulink. Однако для последующего практического использования результатов моделирования в построении цифровой модели МСБ и УТП и горнодобывающего предприятия в целом такой подход не является исчерпывающим. Не удастся учесть с достаточной достоверностью динамическую нагрузку на сеть энергоснабжения (с учетом качества проводных линий и т.п.) и пространственное расположение узлов. Поэтому требования к среде моделирования в данном случае формируются из необходимости применить модель энергосети совместно с моделью функционирования сети БС. Обзор сред моделирования показал, что среди свободно распространяемого ПО нет такого, которое легко позволяло бы учесть сразу все вышеперечисленные аспекты. Наиболее распространенной, документированной и поддерживаемой сообществом является система дискретно-событийного моделирования сетевых структур NS-3[7]. Было принято решение использовать NS-3 для моделирования динамики функционирования участка сети МСБ и УТП с учетом наличия сетевого питания БС и перехода на аккумуляторное питание в альтернативном случае.

Для оценки стоимости линий энергоснабжения требуется учитывать геометрию горных выработок и допустимые места размещения оборудования. Если речь идет о развитии МСБ и УТП на действующих шахтах, то задачу можно свести к вычислению оптимального размещения контроллеров для обеспечения электроснабжения заданного набора базовых станций с минимальными затратами. Дополнить рассмотренную постановку стоит требованием обеспечения заданной надёжности для проектируемой сети электроснабжения БС, т.е. рассмотреть задачу размещения контроллеров для обеспечения электроснабжения заданного набора базовых станций с заданным уровнем надёжности и с минимальными затратами.

Предполагается, что в шахте уже размещены базовые станции, и имеются места для возможного размещения контроллеров (места установки АОШ). В качестве входных данных предлагаемый алгоритм использует ряд параметров, поясняемых ниже, и матрицу расстояний $[Dist]$ размера $N \times A$, где N – количество БС, A – количество АОШ, а $Dist(i, j)$ – расстояние от БС с номером i до АОШ с номером j . В данном случае предполагается, что стоимость подключения пропорциональна длине прокладываемого кабеля, т.е. расстоянию. В противном случае вместо матрицы расстояний может быть использована матрица стоимости подключения БС с номером i до АОШ с номером j , без каких-либо изменений в предлагаемом ниже алгоритме.

В базовом варианте постановки задано количество размещаемых контроллеров – S . В общем случае это число неизвестно, и заданы две верхних грани: \underline{S} – минимальное количество размещаемых контроллеров и \overline{S} – максимальное количество размещаемых контроллеров. Таким образом, определение оптимального значения параметра S из интервала $\underline{S} \leq S \leq \overline{S}$ является отдельной подзадачей. В самом общем случае можно положить $\underline{S}=1$, $\overline{S}=\sum_{j=1}^N Cap(j)$, где $Cap(j)$ – количество контроллеров, которые могут быть размещены в j -м АОШ. Через A_i будем обозначать номер АОШ, к которому подключается (и размещается рядом) КП, к которому подключена БС с номером i , а через A^j будем обозначать номер АОШ, к которому подключается КП с номером j . Также в качестве параметров заданы стоимости размещения и подключения контроллера к конкретному АОШ – $Cost(j)$, и константа $ConCap$ – количество БС, которые могут быть запитаны от одного контроллера.

Тогда задача может быть сформулирована как задача размещения контроллеров в заданных местах для подключения к ним БС с минимальными затратами в условиях вышеописанных ограничений. Математически задача формулируется следующим образом: разместить S ($\underline{S} \leq S \leq \overline{S}$) контроллеров в Ω позиций и приписать каждой БС i соответствующий контроллер A_i для минимизации целевой функции

$$\sum_{j=1}^S Cost(A^j) + \sum_{i=1}^N Dist(i, A_i) \rightarrow \min$$

с учётом ограничений на $Cap(j)$ – количество контроллеров, которые могут быть размещены и подключены к j -му АОШ и $ConCap$ – количество БС, которые могут быть запитаны от одного контроллера.

Точный алгоритм решения подразумевает решение двух подзадач: перебор вариантов размещения (Задача А), которых даже в базовом варианте $C_{\sum_{j=1}^S Cap(j)}^S$, и нахождение оптимального назначения всех БС к расставленным в Задаче А контроллерам (Задача В). Ввиду большой трудоёмкости такого подхода предлагается приближённый алгоритм. Как и в случае точного решения, Задачи А и В могут решаться независимо, т.е. в процессе решения Задачи А каким-либо способом получается вариант размещения контроллеров, для которого решается задача В, далее продолжается выполнение Задачи А, и т.д. до получения приемлемого решения общей задачи. В случае неизвестного S подобный процесс придётся запускать для всех S из интервала $\underline{S} \leq S \leq \overline{S}$.

Для решения Задачи А могут быть использованы различные биоинспирированные техники или какой-либо детерминированный эвристический метод. В первом случае это может быть генетический алгоритм, во втором – хорошо известный метод направленного перебора комбинаций, предложенный С. Лином в 60-е годы 20-го века [8], успешно используемый для решения различных задач дискретной оптимизации, например, для поиска р-медианы.

Решать Задачу В предлагается также приближённым алгоритмом:

1) Для каждого размещённого контроллера j находим его «окружность» Ω_j – т.е. те БС, которые располагаются к нему ближе, чем к другим контроллерам. Если $|\Omega_j| > ConCap$, то оставляем в Ω_j ровно $ConCap$ БС, остальные заносим в множество Ω , которое изначально перед выполнением Шага 1) является пустым.

2) Перебираем элементы множества Ω . Для каждого ищем ближайший контроллер j , такой что $|\Omega_j| < ConCap$ и вносим эту БС в окрестность Ω_j .

3) Вычисляем значение целевой функции C и возвращаемся к выполнению Задачи А, передавая C и набор Ω_j .

4) Если не удаётся найти такой контроллер для какой-либо БС, то решения для данной конфигурации контроллеров не существует. Присваиваем целевой функции значение бесконечности и возвращаемся к выполнению Задачи А.

На выходе алгоритма решения Задачи А (например, методом Лина) с использованием предложенного подхода получим значение C целевой функции и набор Ω_j для каждого

контроллера j для найденной оптимальной конфигурации КП. В случае, если $S_{не}$ было изначально известно, и ещё не все допустимые значения S перебраны, запускаем решение Задачи А с новым S . Когда все возможные S будут перебраны, выбираем то из решений Задачи А, у которого минимальное значение целевой функции.

Для обеспечения надёжного электроснабжения БС необходимо учесть возможный выход из строя линий электропередачи. На практике часто несколько линий электропередачи для питания разных БС размещаются в одном кабеле, и в результате его разрыва может быть обесточено различное количество БС, в зависимости от места разрыва. Таким образом, получаем иерархическую сеть, где первый уровень – кабели, идущие от каждого КП к нескольким БС, а второй уровень – линии электропередачи, связывающие каждую БС с определённым КП. Отказы в сети второго уровня можно считать существенно более редкими, тогда как в сети первого уровня они происходят регулярно. Для учёта живучести системы электроснабжения в шахте необходимо минимизировать максимальное количество линий электропередачи для питания разных БС, проходящих в одной выработке, т.к. её обрушение приведёт к отказу их всех. В этом случае появляется ещё один уровень сети – сеть выработок, которая содержит две другие, и, следовательно, будет первичной.

Для моделирования такой системы можно использовать гиперсеть [9], или какие-либо другие объекты для описания иерархических сетей. В идеале оптимизацию сети нужно осуществлять с учётом всех трёх уровней, но в приближении, возможно и учитывать один уровень, или различные их комбинации, что существенно снизит сложность алгоритмов анализа и оптимизации. При оптимизации сети с учётом надёжности и живучести каждое решение задачи В проверяется на надёжность и/или живучесть, которое при необходимости корректируется, и выбирается более дорогое. В качестве показателей надёжности в рамках описанной иерархической модели можно взять один из показателей, описанных в [9].

Результаты моделирования

На рисунках 1 и 2 показаны результаты моделирования сети, состоящей из двадцати БС, подключенных к одному КП, не имеющему второго независимого входного фидера, в среде NS-3. Учитывается работа оборудования от энергосети шахты и от встроенных в БС аккумуляторов. Рассмотрен период длительностью 48 часов, в качестве начального условия для первых суток задано отсутствие напряжения на выходе КП, для вторых суток – появление питания с требуемыми характеристиками. При построении модели сделаны следующие допущения: параметры линии питания сохраняются в рабочем диапазоне, нагрузка на все БС одинакова, аккумуляторы в БС литий-ионные, хотя в реальном взрывозащищенном оборудовании применяют конкретный тип литий-ионных аккумуляторов – литий-железо-фосфатные.

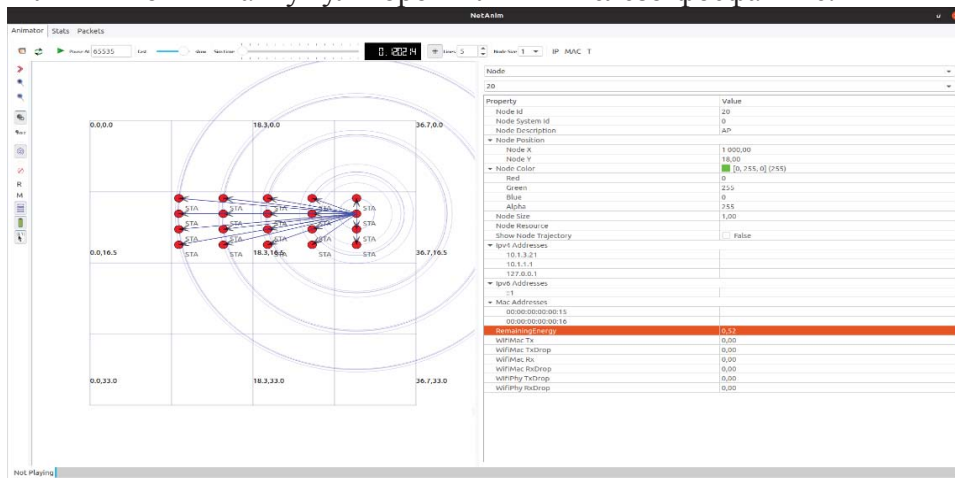


Рис. 1 – Пример моделирования участка МСБ и УТП в среде NS-3

```

gns@gnas:~/ns-allinone-3.30/ns-3.30
AnInattonInterface WARNING:Node:0 Does not have a mobility model. Use SetConstantPosition if it is stationary
AnInattonInterface WARNING:Node:1 Does not have a mobility model. Use SetConstantPosition if it is stationary
AnInattonInterface WARNING:Node:3 Does not have a mobility model. Use SetConstantPosition if it is stationary
AnInattonInterface WARNING:Node:4 Does not have a mobility model. Use SetConstantPosition if it is stationary
At 1 hour Cell voltage: 4.22878 V Remaining Capacity: 88.8477 Ah
At 2 hour Cell voltage: 4.22850 V Remaining Capacity: 97.6955 Ah
At 3 hour Cell voltage: 4.22847 V Remaining Capacity: 86.5433 Ah
At 4 hour Cell voltage: 4.22839 V Remaining Capacity: 95.3911 Ah
At 5 hour Cell voltage: 4.2283 V Remaining Capacity: 94.2389 Ah
At 6 hour Cell voltage: 4.22821 V Remaining Capacity: 93.0868 Ah
At 7 hour Cell voltage: 4.22813 V Remaining Capacity: 91.9347 Ah
At 8 hour Cell voltage: 4.22804 V Remaining Capacity: 90.7826 Ah
At 9 hour Cell voltage: 4.21995 V Remaining Capacity: 89.6305 Ah
At 10 hour Cell voltage: 4.21987 V Remaining Capacity: 88.4783 Ah
At 11 hour Cell voltage: 4.21978 V Remaining Capacity: 87.3264 Ah
At 12 hour Cell voltage: 4.2197 V Remaining Capacity: 86.1744 Ah
At 13 hour Cell voltage: 4.21961 V Remaining Capacity: 85.0225 Ah
At 14 hour Cell voltage: 4.21952 V Remaining Capacity: 83.8705 Ah
At 15 hour Cell voltage: 4.21944 V Remaining Capacity: 82.7186 Ah
At 16 hour Cell voltage: 4.21935 V Remaining Capacity: 81.5667 Ah
At 17 hour Cell voltage: 4.21926 V Remaining Capacity: 80.4148 Ah
At 18 hour Cell voltage: 4.21918 V Remaining Capacity: 79.2629 Ah
At 19 hour Cell voltage: 4.21909 V Remaining Capacity: 78.1111 Ah
At 20 hour Cell voltage: 4.21901 V Remaining Capacity: 76.9593 Ah
At 21 hour Cell voltage: 4.21892 V Remaining Capacity: 75.8075 Ah
At 22 hour Cell voltage: 4.21883 V Remaining Capacity: 74.6557 Ah
At 23 hour Cell voltage: 4.21875 V Remaining Capacity: 73.504 Ah
At 24 hour Cell voltage: 4.21866 V Remaining Capacity: 72.3522 Ah
At 25 hour Cell voltage: 4.21858 V Remaining Capacity: 71.2006 Ah
At 26 hour Cell voltage: 4.21849 V Remaining Capacity: 70.0489 Ah
At 27 hour Cell voltage: 4.2184 V Remaining Capacity: 68.8973 Ah
At 28 hour Cell voltage: 4.21832 V Remaining Capacity: 67.7456 Ah
At 29 hour Cell voltage: 4.21823 V Remaining Capacity: 66.594 Ah
At 30 hour Cell voltage: 4.21815 V Remaining Capacity: 65.4425 Ah
At 31 hour Cell voltage: 4.21806 V Remaining Capacity: 64.2909 Ah
At 32 hour Cell voltage: 4.21797 V Remaining Capacity: 63.1394 Ah
At 33 hour Cell voltage: 4.21789 V Remaining Capacity: 61.9879 Ah
At 34 hour Cell voltage: 4.2178 V Remaining Capacity: 60.8364 Ah
At 35 hour Cell voltage: 4.21772 V Remaining Capacity: 59.6849 Ah
At 36 hour Cell voltage: 4.21763 V Remaining Capacity: 58.5335 Ah
At 37 hour Cell voltage: 4.21755 V Remaining Capacity: 57.3821 Ah
At 38 hour Cell voltage: 4.21746 V Remaining Capacity: 56.2307 Ah
    
```

Рис. 2 – Результат моделирования в NS-3 в численной форме

В таблице 1 приведены результаты математического моделирования оптимального размещения линий энергоснабжения с заданным уровнем надежности. В примере рассматривается участок шахты, оснащенный 40 БС, с тремя возможными местами подключения КП (АОШ). Принято, что БС работают на повышенной мощности и допустимо КП нагружать не более, чем десятью БС. Алгоритм позволяет получить несколько вариантов решения и выбрать оптимальный по стоимости. Расчетная стоимость размещения в данном примере получилась равной 127.

Таблица 1 - Результаты моделирования

№ АОШ	№ КП	№БС
1	1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
2	2	13, 14, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 37
3	3	11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22
	4	23, 24, 25, 26, 31, 32, 36, 38, 39, 40

На рисунке 3 показан пример размещения оборудования системы энергоснабжения МСБ и УТП на участке шахты с учетом результатов моделирования оптимального способа.

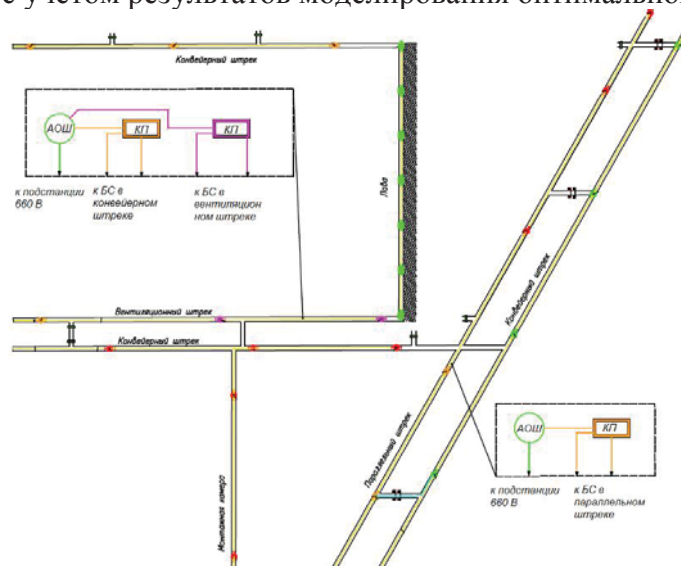


Рис. 3

Заключение

В работе сделана попытка учесть максимальное количество параметров сети энергоснабжения оборудования МСБ и УТП для того, чтобы разработанную модель можно было применить при имитации жизненного цикла самой системы, а результаты моделирования

использовать для анализа ее работоспособности. Выполнить задачу в единой среде моделирования оказалось проблематично, поэтому на данном этапе параметры сети и нагрузка учитывались при моделировании в среде NS-3, а для оптимизация сетей электроснабжения по критерию минимума приведенных затрат на прокладку и при ограничениях надёжности и живучести сетей с учётом их иерархичности предложена в виде алгоритма поиска компромиссного решения. При моделировании пришлось ввести ряд допущений, которые впоследствии могут быть сняты путем дополнения разработанных моделей.

Рассмотренные практические аспекты моделирования сети энергоснабжения оборудования МСБ и УТП на примере системы «Умная шахта[®]» могут быть применены также к МСБ и УТП других производителей.

Литература

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ / КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 01.09.2019).
2. Федеральные нормы и правила «Правила безопасности в угольных шахтах (утверждены Приказом Ростехнадзора от 19.11.2013 N 550) с изменениями на 25 сентября 2018 г. / Техэксперт [Электронный ресурс]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/499060050> (дата обращения: 01.09.2019).
3. ГОСТ Р 54997-2012 «Оборудование горно-шахтное. Системы безопасности угольных шахт многофункциональные. Термины и определения».: введ. 01.01.2015. – М.: Стандартинформ, 2014.
4. ГОСТ Р 55154-2012 «Оборудование горно-шахтное. Системы безопасности угольных шахты многофункциональные. Общие технические требования».: введ. 22.11.2012. – М.: Стандартинформ, 2013.
5. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
6. ГОСТ 31610.11-2014 «Взрывоопасные среды. Часть 11. Оборудование с видом взрывозащиты "искробезопасная электрическая цепь "i"».: введ. 01.12.2016. – М.: Стандартинформ, 2016.
7. Сайт консорциума NS-3 [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.nsnam.org/> (дата обращения: 01.09.2019).
8. S. Lin. Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem, Bell Labs Technical Journal, vol. 44, 1965, pp. 2245–2269.
9. Токтошов Г. Ы., Мигов Д. А. Об оптимизации сетей инженерных коммуникаций различного назначения // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. 2019. № 1. С. 78–90. (DOI: 10.18101/2304-5728-2019-1-78-90).