

Быковская Людмила Владимировна, канд. техн. наук, доцент, **Быковский Виктор Владимирович**, канд. техн. наук, доцент

Оренбургский государственный университет, 460018, Россия, г. Оренбург, пр. Победы, 13.

E-mail: biklud@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Аннотация: В статье представлены результаты исследования процесса передачи электромагнитной энергии с помощью двухпроводной линии электропередачи и создание наиболее оптимальной модели, позволяющей исследовать эти процессы в различных режимах работы линии. Объектом проведенного исследования является двухпроводная линия электропередачи, в роли предмета исследования выступают электромагнитные процессы, протекающие в воздушных линиях электропередачи.

Ключевые слова: Линия электропередачи, линия с распределенными параметрами, электромагнитное поле, имитационная модель, распределение напряжения, четырехполюсник.

Информация о статье: принята 19 ноября 2018 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2018-5-11-15

Различают воздушные и кабельные линии электропередачи [1].

Целью представленной работы являлось исследование процесса передачи электромагнитной энергии с помощью двухпроводной линии электропередачи и создание наиболее оптимальной модели, позволяющей исследовать эти процессы в различных режимах работы линии. Для решения поставленной задачи была рассмотрена однофазная (двухпроводная) воздушная линия электропередачи (ЛЭП), были созданы математическая и имитационная модели линии, рассчитаны напряжения и показаны их распределение вдоль линии при различных режимах работы [2,3,4,5].

Моделирование процессов передачи электромагнитной энергии в линиях с распределенными параметрами является актуальной задачей, так как позволяет анализировать процессы в ЛЭП, линиях связи, в антенно-фидерных устройствах и других аналогичных установках, линейные размеры которых соизмеримы с длиной волны электромагнитного колебательного процесса [6,7]. Достоверный анализ передачи электрической энергии по ЛЭП является одним из обязательных условий обеспечения надежного электроснабжения объектов различного назначения. В качестве объекта исследования выбрана **однофазная двухпроводная линия электропередачи**. В ней используются два провода: фазный (L) и нулевой (N). Двухпроводная электрическая сеть была и остается самой распространенной в жилом фонде. Значительная часть оборудования таких линий требует технического перевооружения, которое невозможно без проведения исследований в данной области. Кроме того, все схемы замещения ЛЭП построены для одной фазы [8,9,10]. Параметры длинной линии зависят от ее вида (воздушная, кабельная), взаимного расположения проводов,

геометрических размеров, материала и частоты приложенного напряжения.

С развитием информационных технологий моделирование физических процессов при проведении исследований проводится в виртуальном (имитационном) виде, а уже затем, при необходимости, на реальных моделях [11,12,13].

В рамках данной работы исследование волновых процессов в линии сводится к рассмотрению цепи с распределенными параметрами, где каждый малый элемент линии (dl), приходящийся на ее длину, обладает активным сопротивлением и индуктивным сопротивлением ($R_0 dl$ и $L_0 dl$ соответственно), а также активной и емкостной проводимостью ($G_0 dl$ и $C_0 dl$ соответственно). Напряжение между проводами линии будет различным и по величине, и по фазе вдоль всей длины линии, точно так же, как и токи. Следовательно, возникает необходимость определения взаимосвязи между входными и выходными напряжениями и токами. Рассмотрение взаимной связи осуществляется в дифференциальной форме [9]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \end{cases}$$

Наличие частных производных в уравнениях обусловлено тем, что напряжение и ток зависят от двух аргументов (времени и координаты). Если в линии установился режим гармонических колебаний, то можно применять символьный метод анализа, а так как комплексные амплитуды напряжения и тока не зависят от времени, то вид телеграфных уравнений существенно упрощается:

$$-\frac{d\dot{u}}{dx} = (R_0 + j\omega L_0) \cdot \dot{i} = \underline{Z}_0 \cdot \dot{i}; \quad (1)$$

$$-\frac{d\dot{i}}{dx} = (G_0 + j\omega C_0) \cdot \dot{u} = \underline{Y}_0 \cdot \dot{u}. \quad (2)$$

Изначально рассматриваются изменения, происходящие в бесконечно малом элементе длины линии, затем изменения в каждом бесконечно малом элементе суммируются. При проведении ручного расчета существующей математической модели линии с распределенными параметрами возникает проблема – в общем виде решение телеграфных уравнений весьма затруднительно и, следовательно, возникает необходимость в поиске альтернативных способов получения результата [14].

Начальным этапом в моделировании линии с распределенными параметрами было исследование процессов передачи электромагнитной энергии на

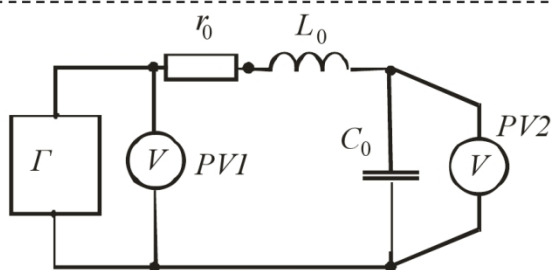


Рис. 1. Электрическая схема одного звена модели двухпроводной линии

Fig.1. Electric circuit of one link of two-wire line model

физической модели в лаборатории ТОЭ. Модель состоит из шестнадцати четырехполюсников. Параметры четырехполюсников: $C_0=0,015$ мкФ, $R_0=9$ Ом, $L_0=4$ мГн. Электрическая схема линии с распределенными параметрами приведена на рисунке 1 [8].

Источником синусоидального напряжения служит генератор сигналов ГЗ-123, позволяющий изменять частоту питающего напряжения в диапазоне частот от 10 Гц до 200 кГц.

При подготовке к выполнению эксперимента были определены следующие величины: волновое (характеристическое) сопротивление, коэффициент фазы для одного звена модели длинной линии на частоте $f=10$ кГц, параметры линии (длина l , волновое

сопротивление Z_B и коэффициент фазы β), эквивалентной одному четырехполюснику и длину линии, эквивалентной цепочке из 16 звеньев.

В процессе эксперимента были определены распределения действующего значения напряжения модели длинной линии в режимах холостого хода, короткого замыкания и при согласованной нагрузке.

Напряжения в узловых точках схемы замещения, соответствующие точкам по длине линии, измерялись электронным вольтметром.

Проведенные опыты были подтверждены расчетами в системе Mathcad. (Mathcad – продукт компании Parametric Technology Corporation, США).

Средствами Mathcad были решены уравнения для линии с распределенными параметрами в гиперболической форме в трех режимах [6]:

- в режиме холостого хода:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cdot ch(\underline{\gamma} \cdot l); \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{Z} \cdot sh(\underline{\gamma} \cdot l). \end{cases} \quad (3)$$

- в режиме короткого замыкания:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = Z \cdot \dot{I}_2 \cdot sh(\underline{\gamma} \cdot l); \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 ch(\underline{\gamma} \cdot l). \end{cases} \quad (4)$$

- в режиме произвольной нагрузки:

$$\begin{cases} \dot{U}(y) = \dot{U}_2 ch(\underline{\gamma} \cdot y) + Z \cdot \dot{I}_2 \cdot sh(\underline{\gamma} \cdot y); \\ \dot{I}(y) = \frac{\dot{U}_2}{Z} sh(\underline{\gamma} \cdot y) + \dot{I}_2 \cdot ch(\underline{\gamma} \cdot y). \end{cases} \quad (5)$$

Результаты проведенных физических экспериментов совпали с кривыми распределения напряжения, полученными по результатам решения систем уравнений в Mathcad, что позволяет использовать результаты математического моделирования для анализа процесса передачи электрической энергии в двухпроводной линии и использовать в качестве образца для определения истинности ее имитационного аналога.

Исходные данные для моделирования: $U=400$ кВ – линейное напряжение сети, к которой подключена линия; $f=50$ Гц – частота; $l=9000$ км – длина линии,

была принята условно для демонстрации волнового процесса; $R_0=0.08$ Ом/км – продольное активное сопротивление линии; $g_0=3.75 \cdot 10^{-8}$ См/км – поперечная проводимость; $L_0=1.336 \cdot 10^{-3}$ Гн/км – продольная индуктивность линии; $C_0=8.6 \cdot 10^{-9}$ Ф/км – погонная емкость между линией и землей. Распределение величины напряжения вдоль линии в режимах работы холостого хода, короткого замыкания,

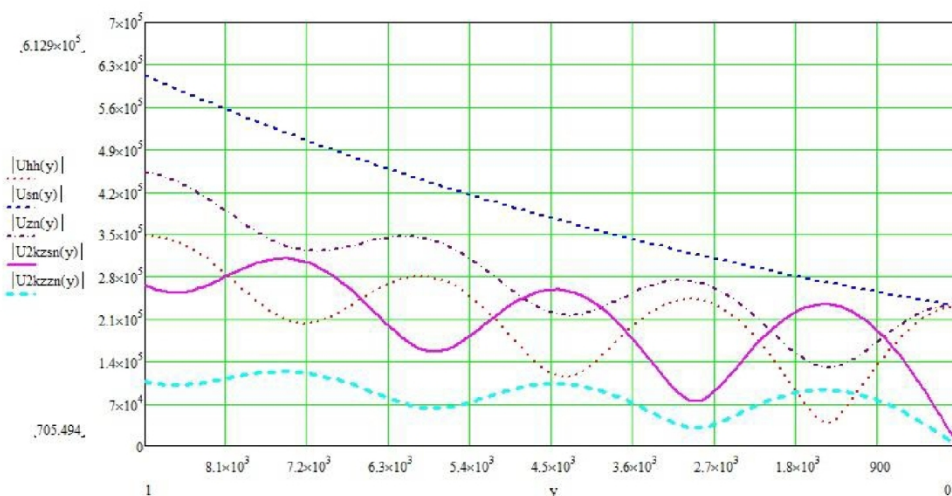


Рис. 2. Распределение величины напряжения вдоль линии

Fig.2. Voltage distribution along the line

согласованной нагрузки и двух различных нагрузочных по результатам расчета в Mathcad, представлены на рисунке 2.

При расчетах были приняты допущение: фазовая скорость волны принимается равной скорости света.

Имитационная модель линии с распределенными параметрами была реализована в среде имитационного моделирования MatLab (Simulink) [15].

Часть модели, имитирующая работу линии с распределенными параметрами, разбита на 9 блоков

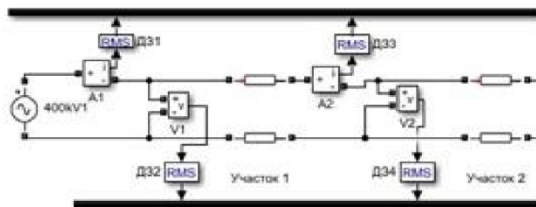


Рис. 3. Участок имитационной модели линии с распределенными параметрами

Fig.3. Section of the line simulation model with distributed parameters

Distributed parameters line, последовательно соединенных между собой. Каждый блок эквивалентен участку линии с распределенными параметрами длиной 100 километров. Подобное разбиение линии вызвано необходимостью проведения замеров в различных точках, а проведение замеров подобным образом, в свою очередь, связано с необходимостью построения распределения напряжения вдоль линии на основе выполненных измерений. Погонные параметры каждого блока задаются согласно исходным данным, используемым в математической модели линии с распределенными параметрами.

По сравнению с блоком, моделирующим работу линии со сосредоточенными параметрами, блок линии с распределенными параметрами с гораздо большей точностью отражает явление падения и отражения волны в линии. Для наглядности, можно смоделировать параллельную работу двух блоков: линии с распределенными параметрами и линии с сосредоточенными параметрами. Схема, собранная

в Matlab для данного эксперимента, будет выглядеть согласно изображению на рисунке 4 [16].

В случае модели, имитирующей работу многофазной линии, ее математическая модель трансформируется путем преобразования фазных параметров линии (токов и напряжений). Фазные параметры выражаются в условных (относительных) единицах, независимых друг от друга. Все представленные расчеты выполняются в относительных единицах, а затем переводятся в именованные.

Данная модель неточно отражает частотную зависимость от RLC-параметров реальных линий электропередачи. Это связано с поверхностным эффектом в проводниках и заземлении.

Подробно рассмотрим распределение напряжения вдоль 900 км линии (реальная длина ЛЭП) при отсчете от нагрузки. Согласно схеме, точками замеров тока и напряжения линии является точка на 1 километре, на 451 километре и на 901 километре. По результатам моделирования в течение 0.2 секунды (время моделирования допускается корректировать) Matlab строит временные характеристики тока и напряжения [16].

При сопоставлении результатов распределения напряжений вдоль линии с распределенными параметрами, построенных на основе математической модели в Mathcad, рисунок 5, и имитационной модели в MatLab, рисунок 6, можно сделать вывод о том, что обе модели пригодны для анализа входных и выходных величин в длинных линиях в различных режимах работы.

По результатам проделанных исследований можно сделать следующие выводы: на базе среды имитационного моделирования Matlab реализована имитационная модель линии с распределенными параметрами; данная модель является адекватной, что подтверждается совпадением результатов построения кривых распределения величины напряжения вдоль линии при различных режимах работы при аналитическом и имитационном моделировании.

Исходя из всего вышеперечисленного, следует, что реализованная имитационная модель может быть использована в дальнейших исследованиях.

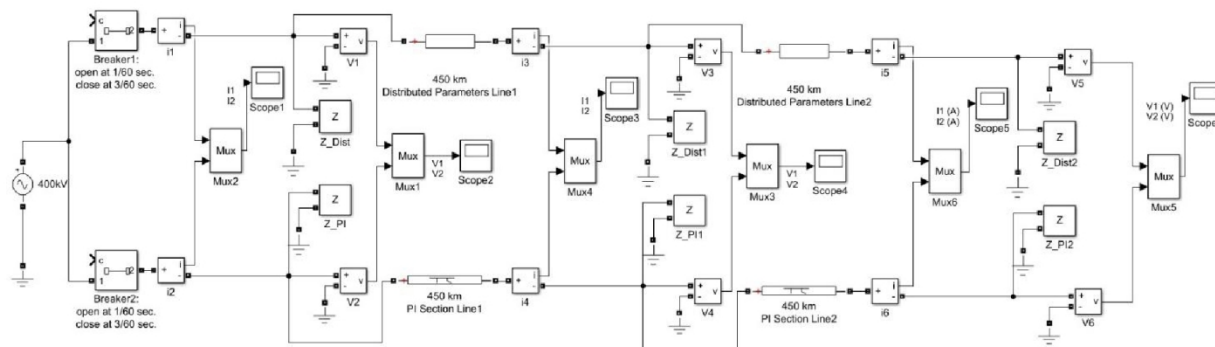


Рис. 4. Схема моделирования работы линии с распределенными параметрами и линии с сосредоточенными параметрами в режиме холостого хода в Matlab

Fig.4. The scheme of modeling the line with distributed parameters and the line with concentrated parameters in the idle mode in the Matlab

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедева, Ю. В. Техническое состояние электрических сетей России и перспективы их развития / Ю.В. Лебедева, Н.Ю. Шевченко, К.Н. Бахтияров // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №4. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9808>
2. Ананичева, С.С. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: учебное пособие / С. С. Ананичева, А. Л. Мызин; 6-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ. 2012. – 80 с.
3. Rakosh Das Begamundre Extra High Voltage AC Transmossion Engineering. 3 изд. Kenpur, India: New age international (p) limited, publishers, 2006.
4. Шклярский Я.Э., Соловьев С.В. Сравнение эффективности передачи электроэнергии на примере ЛЭП постоянного и переменного тока // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург. 2016 г. №6. С 170-175. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.034>
5. Таланов, С. Б. Устойчивость и предельные режимы дальних линий электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами : диссертация ... кандидата технических наук : 05.14.02.- Санкт-Петербург, 1998.- 139 с.: ил. РГБ ОД, 61 99-5/1093-5
6. Бессонов, В.А. Расчет потенциалов, наведенных электрическим полем в изолированных проводах контактной сети и линии ДПП / В.А. Бессонов, В.С. Матющенко // Межвуз. сб. науч. тр. ДВГУПС: "Повышение эффективности и надежности систем электроснабжения". – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 1999.
7. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники [Текст] : учеб. для вузов / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин.- 5-е изд. - СПб. : Питер, 2009. - (Учебник для вузов) Т. 2. - 2009. - 432 с.
8. Коровкин Н.В, Ткаченко С.В. Уравнения и схема замещения длинной линии с учетом излучения электромагнитной энергии* // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. №3. С. 8-18.
9. Татур, Т.А. Установившиеся и переходные процессы в электрических цепях : учеб. пособие для вузов по электротехн. спец. направлений подгот. дипломир. специалистов в обл. техники и технологии / Т.А. Татур, В.Е. Татур. - Москва : Высшая школа, 2001. - 407 с.
10. Быковская, Л.В. Моделирование электрического и магнитного полей воздушной линии электропередачи. / Л.В. Быковская, Е.В. Чурикова. / Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. - № 5(117). С. 80-86.
11. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения [Электронный ресурс] : учебник для вузов / Ю.П. Рыжов. – Электрон. текстовые данные. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/33128.html>
12. Дубкова А.Д., Долингер С.Ю. Преимущества и недостатки сети с компенсированной нейтралью // Научное сообщество XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. XLVII междунар. науч.-практ. конф. № 10(46). URL: [https://sibac.info/archive/technic/10\(46\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/10(46).pdf)
13. Алиев И.И. Энергосберегающая резонансная однопроводная ЛЭП // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2011. - №6. С. 35—38.
14. Быковская, Л.В. Исследование процессов передачи электромагнитной энергии в двухпроводных линиях: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции /Л.В.Быковская, К.А. Чижев. - Оренбург. гос. ун-т. – Электрон. дан. – Оренбург: ОГУ, 2017. С.561-564
15. S. J. Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, online book, 2011, available freely from: <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>
16. Быковская, Л.В. Имитационная модель однофазной линии с распределенными параметрами / Л.В. Быковская, К.А. Чижев // Шаг в науку. – 2018. – №3. – С. 43–46.

Lyudmila V. Bykovskaya, C.Sc. (Engineering), Associate Professor, Victor V. Bykovskiyi, C.Sc. (Engineering), Associate Professor

Orenburg State University, Victory boulevard,13, Orenburg, 460018, Russian Federation.

MATHEMATICAL MODELING OF AIR LINES OPERATION MODES WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

Abstract: The article presents the results of the study of the process of electromagnetic energy transmission using a two-wire power line and the creation of the most optimal model that allows to study these processes in different modes of operation of the line. The object of the study is a two-wire transmission line, and the subject of the study is presented by the electromagnetic processes occurring in overhead power lines.

Keywords: Power line, line with distributed parameters, electromagnetic field, simulation model, voltage distribution, quadrupole.

Article info: received November 19, 2018

DOI: 10.26730/1816-4528-2018-5-11-15

REFERENCES

1. Lebedev, Yu. V. Technical condition of electric networks of Russia and prospects of their development] / Yu. V. Lebedev, N. Yu. Shevchenko, K. N. Bahtiarov // Modern problems of science and education. - 2013. - №4. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9808>
2. Ananicheva, S. S. equivalent circuit and steady-state modes of power grids: a tutorial / S. S. Ananichev, A. L. Myzin; 6th ed., ISPR. Ekaterinburg: Urfu. 2012. - 80 p.
3. Rakosh Das Begamundre Extra High Voltage AC Transmission Engineering. 3 ed. Kenpur, India: New age international (p) limited, publishers, 2006.
4. Shklyarsky ya. E., Soloviev S. V. Comparison of power transmission efficiency on the example of DC and AC power lines // international research journal. - Yekaterinburg. 2016 №6. From 170-175. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.034>
5. Talanov, S. B. Resistance and the limiting regimes of the far lines with controlled shunt reactors : dissertation ... candidate of technical Sciences: 05.14.02.- St. Petersburg, 1998. - 139 p.:
6. Calculation of the potential induced by the electric field in the insulated wires of the contact network and the line DPR / V. Bessonov, V. S. matyushchenko // Mezhlvuz. SB.nauch. Tr. FESTU: "improving the efficiency and reliability of power supply systems". - Khabarovsk: Publishing house dygups, 1999.
7. Demirchyan, K. S. Theoretical bases of electrical engineering [Text]: studies. for high schools / K. S. Demirchyan, L. R. Neumann, N. V. Korovkin. - 5th ed. - SPb. : Peter, 2009. - (Textbook for universities) Vol. 2. - 2009. - 432 p.:
8. Korovkin N. In, Tkachenko S. V. Equations and equivalent circuit of a long line taking into account electromagnetic energy radiation* // Proceedings of the Kola scientific center RAS. 2012. No. 3. P. 8-18.
9. Tatur, T. A. Established and transients in electrical circuits: studies. manual for universities in electrical engineering. spets. areas of training. diploma. specialists in region of engineering and technology / T. A. Tatur and V. E. Tatur. - Moscow: Higher school, 2001. - 407 p.:
10. Bykovskaya, L. V. Modeling of electric and magnetic fields of an air power line. / L. V. Bykovskaya, E. V. Churikova. / Bulletin of the Kuzbass state technical University. - 2016. - № 5 (117). P. 80-86.
11. Ryzhov Yu. p. long EHV transmission lines [Electronic resource] : textbook for high schools / Yu. p. Ryzhov. — Electron. text data. — M. : publishing house of MPEI, 2007. - 488 C. - Mode of access: <http://www.iprbookshop.ru/33128.html>
12. Dubkova A. D., S. Y. Dollinger the advantages and disadvantages of a network with a compensated neutral // the Scientific community of XXI century. Engineering science: collection of articles on the Mat. XLVII international. scientific.- prakt. Conf. No. 10 (46). URL: [https://sibac.info/archive/technic/10\(46\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/10(46).pdf)
13. Aliyev I. I. energy-Saving resonant single-wire transmission line // energy Security and energy saving. - 2011. - №6. P. 35-38.
14. Research of processes of electromagnetic energy in two-wire lines: the University complex as a regional center of education, science and culture: materials of the all-Russian scientific-methodical conference /L. V. Bykovskaya, K. A. Chizhov. - Orenburg.state University – Electron. dan. - Orenburg: OSU, 2017. C. 561-564
15. S. J. orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, online book, 2011, available freely from: <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>
16. Bykovskaya, L. V. simulation model of single-phase line with distributed parameters / L. V. Bykovskaya, K. A. Chizhov // Step into science. - 2018. - №3. - P. 43-46.

Библиографическое описание статьи

Быковская Л.В., Быковский В.В. Математическое моделирование режимов работы воздушной линии с распределенными параметрами // Горное оборудование и электромеханика — 2018. — № 5 (139). — С. 11-15.

Reference to article

Bykovskaya L.V., Bykovskiy V.V. Mathematical modeling of air lines operation modes with distributed parameters. Mining Equipment and Electromechanics, 2018, no. 5 (139), pp. 11-15.