

К.В. Менакер¹, П.В. Савченко²

¹ Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

² Российская открытая академия транспорта, г. Москва, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА САМОВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА НА ОСНОВЕ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ДЛИННОЙ ЛИНИИ

Аннотация. В данной статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований явления самовозбуждения колебательного контура, реализованного на основе короткозамкнутой длиной линии, обнаруженного в ходе многочисленных экспериментов с симметричными длинными линиями, проводимыми с целью получения высокодобротного колебательного контура. Режим самовозбуждения отрезка короткозамкнутой линии характеризуется лавинообразным увеличением напряжения на концах линии после действия на нее одиночного импульса. Данная работа посвящена определению условий возникновения указанного режима в реальных условиях и теоретическому обоснованию возможности его появления.

Ключевые слова: симметричная длинная линия, частота свободных колебаний, эквивалентная индуктивность, режим самовозбуждения.

К. V. Menaker¹, P. V. Savchenko²

¹ Trans-Baikal Institute of Railway Transport, Chita, Russian Federation

² Russian Open Academy of Transport, Moscow, Russian Federation

STUDY OF THE SELF EXCITATION OF THE OSCILLATORY CIRCUIT BASED ON A SHORT-CIRCUITED LONG LINE

Abstract. This article presents the results of theoretical and experimental studies of the phenomenon of self-excitation of an oscillatory circuit, implemented on the basis of a short-circuited line length, discovered in the course of numerous experiments with symmetric long lines, conducted in order to obtain a high-quality oscillatory circuit. The self-excitation mode of a short-circuited line segment is characterized by an avalanche-like increase in the voltage at the ends of the line after the action of a single pulse on it. This work is devoted to the determination of the conditions for the occurrence of this regime in real conditions and the theoretical justification of the possibility of its occurrence.

Key words: symmetric long line, free oscillation frequency, equivalent inductance, self-excitation mode.

Введение

В ряде работ зарубежных и отечественных ученых было установлено, что сильная положительная электромагнитная связь, организованная в электротехнических устройствах, разрушает симметрию взаимодействия [1 – 6]. Система, начав движение, ускоряется, несмотря на трение, сопротивление и потери. Примерами организации положительной электромагнитной связи являются различные конструкции униполярных электродвигателей, индукторный генератор с униполярной обмоткой возбуждения на статоре.

Колебательные контура, созданные на основе плоской бифилярной катушки также являются примерами реализации положительной обратной электромагнитной связи [7].

Длительные эксперименты с симметричными длинными линиями, проводимые авторами с целью получения высокодобротных колебательных контуров, привели к открытию новых режимов работы, связанных с самовозбуждением отрезков короткозамкнутой или разомкнутой длинной линии, характеризующихся лавинообразным увеличением их электрических параметров (напряжения или тока) после воздействия одиночным импульсом.

Многokратная фиксация условий эксперимента и имитационное моделирование в известном программном комплексе Multisim позволили установить основные закономерности появления указанных режимов:

- суммарная длина линии (прямого и обратного провода) должна быть равна четверти длины волны;
- наличие сосредоточенной емкости параллельно выводам линии (рис. 1);
- совпадение частоты свободных колебаний линии и частоты свободных колебаний колебательного контура, образованного сосредоточенной емкостью и эквивалентной индуктивностью отрезка линии;
- совпадение добротности длинной линии со значением добротности колебательного контура, образованного сосредоточенной емкостью и эквивалентной индуктивностью отрезка линии;
- значения указанных добротностей должно превышать 1000-1500 единиц.

С целью прогнозирования режима самовозбуждения колебательного контура на основе короткозамкнутой длинной линии была разработана методика определения электрических параметров, при которых соблюдаются вышеуказанные условия.

Методика прогнозирования режима самовозбуждения колебательного контура на основе короткозамкнутой длинной линии

Частота свободных колебаний отрезка короткозамкнутой линии [8]:

$$f_l = \frac{1}{4 \cdot l \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}}, \quad (1)$$

где l – длина линии;

L_1 – удельная индуктивность линии;

C_1 – удельная емкость линии.

При наличии емкости C_2 на входе длинной линии частота свободных колебаний образованного контура во многом зависит от распределения напряжения и тока вдоль линии в момент предшествующий коммутации (размыканию ключа) (рис. 1).

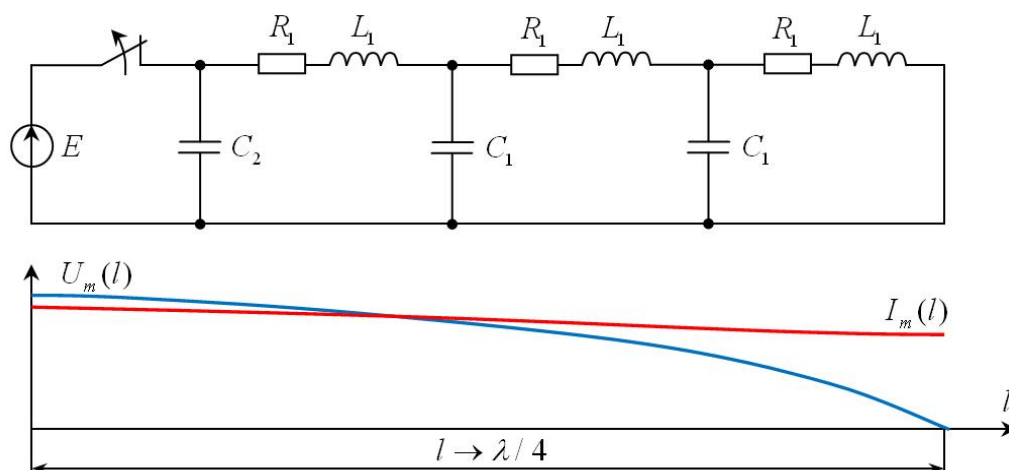


Рис. 1. Диаграмма распределения амплитуды тока и напряжения по длине короткозамкнутого отрезка линии

Напряжение вдоль длинной линии изменяется от значения источника E в начале линии до 0 в конце по известному закону [8]:

$$U_m(x) = E \cdot \sin[\beta \cdot (l - x)], \quad (2)$$

где β – коэффициент фазы.

Ток вдоль длины линии уменьшается по известному закону [8]:

$$I_m(x) = I_1 \cdot e^{-\alpha \cdot x}, \quad (3)$$

где α – коэффициент ослабления.

На основе выражений (2) и (3) суммарная эффективная емкость и индуктивность линии с учетом действия емкости C_2 могут быть определены как [8]:

$$C_3 = C_2 + \int_0^l C_1 \cdot \sin[\beta \cdot (l-x)] \cdot dx, \quad (4)$$

$$L_3 = \int_0^l L_1 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \cdot dx \quad (5)$$

С учетом выражений (4) и (5) частота отрезка длиной линии при наличии емкости C_2 может быть определена:

$$f_{лс} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_3 \cdot C_3}} \quad (6)$$

Недостатком выражений (4 – 6) является зависимость их параметров α, β от частоты, значение которой требуется еще найти.

Частота свободных колебаний отрезка короткозамкнутой длиной линии при наличии емкости C_2 может быть также определена с помощью следующего эмпирического выражения, найденного с учетом малости коэффициента ослабления α :

$$f_{лс} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot l \cdot \left[C_1 \cdot \left(\frac{l}{2} - 1 \right) + C_2 \right]}}, \quad (7)$$

Уточнение значения частоты свободных колебаний отрезка линии, найденного по формуле (7), возможно с помощью выражения (6).

В тоже самое время значение частоты свободных колебаний отрезка короткозамкнутой линии длиной в четверть длины волны может быть найдено в виде частоты свободных колебаний эквивалентного колебательного контура, образованного емкостью C_2 и эквивалентной индуктивностью отрезка линии $L_{экв}$ [8]:

$$f_{к} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{экв} \cdot C_2}} \quad (8)$$

где $L_{экв}$ – эквивалентная индуктивность отрезка линии длиной l [8]:

$$L_{экв} = \frac{|Z_г|}{\omega_{св}} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot l \right) = \frac{|Z_г|}{2 \cdot \pi \cdot f_{лс}} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot l \right), \quad (9)$$

где $\omega_{св}$ – частота свободных колебаний, может быть принята равной $2 \cdot \pi \cdot f_{лс}$;

λ – длина волны;

$|Z_г|$ – модуль волнового сопротивления линии.

Волновое сопротивление и длина волны в выражении (9) также являются функциями частоты:

$$Z_г = \sqrt{\frac{R_1 + j \cdot \omega_{св} \cdot L_1}{G_1 + j \cdot \omega_{св} \cdot C_1}},$$

$$\lambda = 2 \cdot \pi / \beta = 2 \cdot \pi / \operatorname{Im}(\gamma), \quad \gamma = \sqrt{(R_1 + j \cdot \omega_{св} \cdot L_1) \cdot (G_1 + j \cdot \omega_{св} \cdot C_1)}, \quad (10)$$

где G_1 – удельная проводимость линии;

γ – коэффициент распространения линии.

и могут быть найдены через ранее определенное значение частоты свободных колебаний линии $\omega_{св} = 2 \cdot \pi \cdot f_{лс}$

Совместное решение уравнений (7) и (8) позволяет определить значение длины линии, значение емкости C_2 , частоты свободных колебаний, при которых возникнет режим самовозбуждения линии.

Требования к высокой добротности длинной линии существенно упрощает аналитическую задачу. Ряд искомым параметров можно найти для линии без потерь ($R_1 = 0, G_1 = 0$):

$$Z_6 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad \lambda = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{св} \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} = \frac{1}{f_{св} \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}}$$

$$L_{экр} = \frac{|Z_6|}{2 \cdot \pi \cdot f_{св}} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot l \right) = L_1 \cdot \sqrt{\frac{l}{C_1} \cdot \left[C_1 \cdot \left(\frac{l}{2} - 1 \right) + C_2 \right]} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\sqrt{C_1}}{\sqrt{l \cdot \left[C_1 \cdot \left(\frac{l}{2} - 1 \right) + C_2 \right]}} \cdot l \right)$$

$$f_{к}(l) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{экр} \cdot C_2}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot \sqrt{\frac{l}{C_1} \cdot \left[C_1 \cdot \left(\frac{l}{2} - 1 \right) + C_2 \right]} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\sqrt{C_1}}{\sqrt{l \cdot \left[C_1 \cdot \left(\frac{l}{2} - 1 \right) + C_2 \right]}} \cdot l \right) \cdot C_2}} \quad (11)$$

Совместное решение уравнений (7) и (11) удобнее осуществлять графическим путем (рис. 2).

Проверка адекватности разработанной методики прогнозирования режима самовозбуждения колебательного контура на основе короткозамкнутой длинной линии

Проверка адекватности разработанной методики проводилась путем имитационного моделирования и многочисленных опытных испытаний. Приведем пример анализа короткозамкнутой линии длиной 7 м, с погонными параметрами $L_1 = 0.479 \text{ мкГн/м}$, $C_1 = 64.4 \text{ нФ/м}$, $R_1 = 0.014 \text{ Ом/м}$. Принципиальная схема испытаний приведена на рис. 3.

Для исследуемой линии при емкости $C_2 = 650 \text{ пФ}$ частота свободных колебаний согласно выражения (7) $f_{лс} = 3.052 \text{ МГц}$, длина волны $\lambda = 58.992 \text{ м}$, четверть длины волны $\lambda/4 = 14.748 \text{ м}$, волновое сопротивление линии $Z_6 = 86.243 - j \cdot 0.066 \text{ Ом}$, эквивалентная индуктивность согласно выражения (9) $L_{экр} = 4.153 \text{ мкГн}$, частота свободных колебаний эквивалентного колебательного контура согласно выражения (11) $f_{к} = 3.063 \text{ МГц}$.

На рис. 2 представлены графики функций (7) и (11) в зависимости от длины линии. Анализ графиков показывает, что их совместное решение соответствует длине линии 7 м при частоте свободных колебаний 3.052 МГц.

Полученные результаты полностью подтверждаются опытными данными и результатами моделирования, представленными на рис. 3, 4. В ходе проведенных исследований были достигнуты требуемые условия самовозбуждения длинной линии.

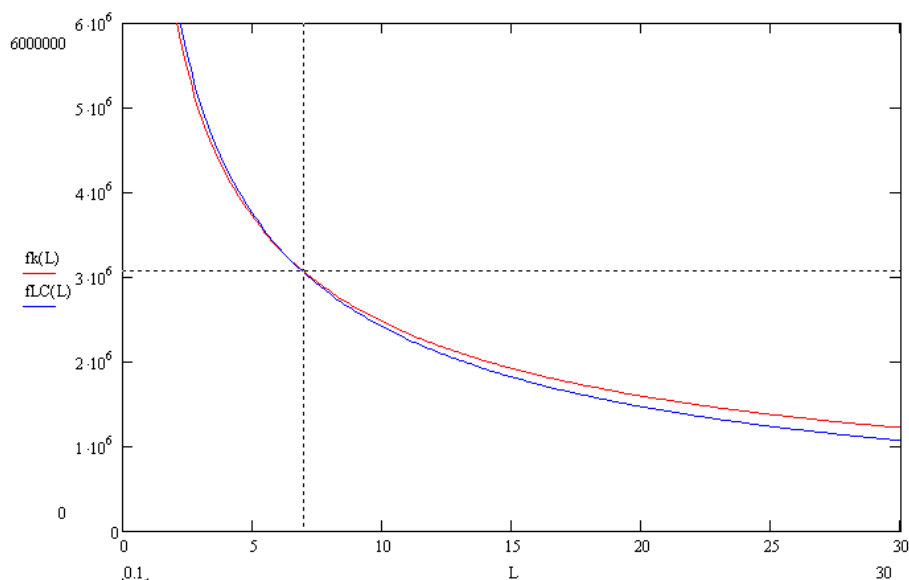


Рис. 2. Графики функций (7) и (11) в зависимости от длины линии при значении емкости $C_2 = 650$ пФ

Суммарная длина провода линии составила 14 м (четверть длины волны 14.748 м). Частота свободных колебаний линии 3.019 МГц практически совпала с частотой свободных колебаний контура, образованного емкостью и эквивалентной индуктивностью отрезка длинной линии.

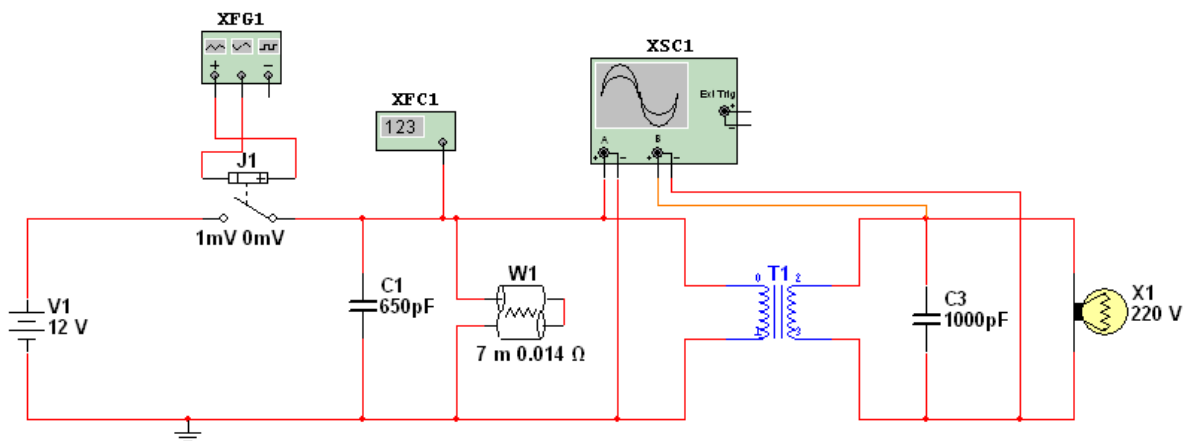


Рис. 3. Исследуемая схема колебательного контура на основе короткозамкнутой длинной линии

Значения добротностей длинной линии и колебательного контура, образованного сосредоточенной емкостью и эквивалентной индуктивностью отрезка линии могут быть определена с помощью следующих известных зависимостей:

- добротность линии:

$$Q_l = \frac{1}{R_1} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (12)$$

- добротность эквивалентного контура:

$$Q_k = \frac{1}{R_1} \cdot \sqrt{\frac{L_{\text{экв}}}{C_2}} \quad (13)$$

Для рассматриваемого примера добротность линии составила 6160, добротность эквивалентного контура 5709, что удовлетворяет условиям режима самовозбуждения.

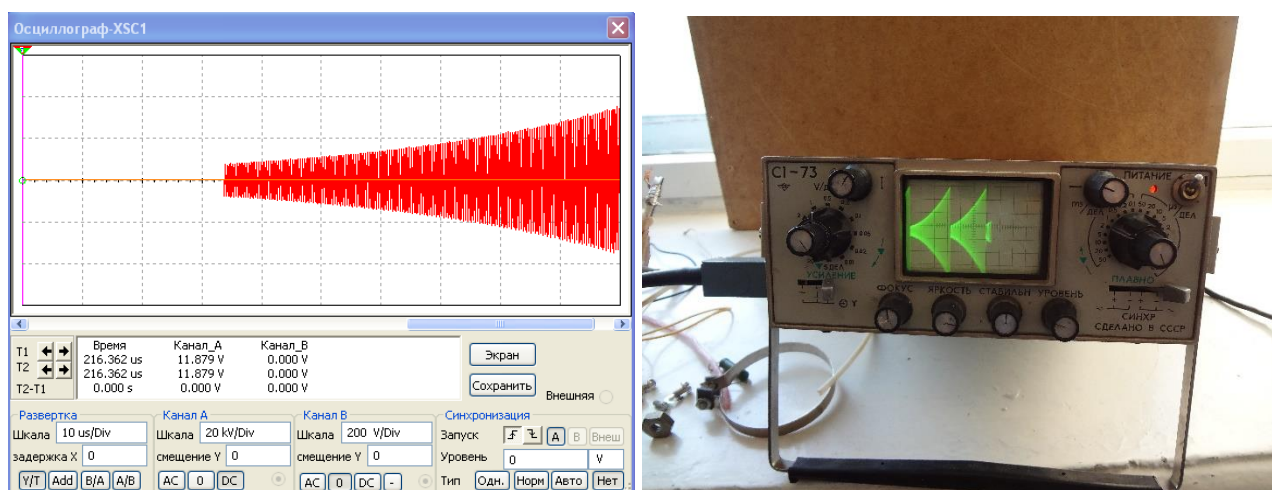


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на выходах исследуемой линии при размыкании ключа

Заключение

Режим самовозбуждения колебательного контура на основе короткозамкнутой длинной линии требует дальнейших исследований. Причины данного явления предположительно кроются в многократных отражениях и сложениях волн от короткозамкнутого участка и далее от емкости C_2 . Однако, данное утверждение требует теоретического и экспериментального доказательства.

В целом открытый режим самовозбуждения отрезков длинных линий может иметь большое практическое значение при построении высокоэффективных, высоковольтных генераторов синусоидального сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Епифанов О.К. Особенности проектирования униполярного индукторного моментного двигателя с осевым магнитным потоком постоянных магнитов // Электротехника. – 2007. – № 1. - С. 43-51.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитный расчет индукторного генератора с униполярной обмоткой возбуждения на статоре // Электричество. – 2007. - № 10. - С. 18-23.
3. Майер В.В. Современные модели униполярных электродвигателей // Потенциал. - 2010. - № 4. - С. 73-78.
4. Майер В.В. Униполярные электродвигатели Фарадея и Барлоу // Потенциал. – 2010. - № 3. - С. 62-68.
5. Майер В.В. Униполярный электромотор и фундаментальные законы физики // Потенциал. - 2010. - № 5. - С. 67-73.
6. Малыгин В.М. Пространственная геометрия электрических и магнитных цепей и принцип действия биполярных и униполярных электрических машин постоянного тока // Электрика. – 2007. - № 9. - С. 28-32.
7. Менакер К.В., Яковлев Д.А., Востриков М.В. Повышение эффективности работы систем электропитания нетяговых потребителей // Известия Транссиба. – 2018. - № 2 (34) - С. 85-94.
8. Попов В.П. Основы теории цепей. Учебник для вузов. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2000 – 575 с.

9. Щербаков А.В. Высоковольтный высокочастотный униполярный коммутатор на основе электронно-лучевого вентиля // Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. - 2009. - № 1. - С. 34-38.

REFERENCES

1. Epifanov O.K. Design features of a unipolar inductor torque motor with axial magnetic flux of permanent magnets//Electrical engineering. – 2007. – № 1. - S. 43-51.
2. Ivanov-Smolensky A.V. Electromagnetic calculation of an inductor generator with a unipolar excitation winding on the stator//Electricity. – 2007. - № 10. - S. 18-23.
3. Mayer V.V. Modern models of unipolar motors//Potential. - 2010. - № 4. - S. 73-78.
4. Mayer V.V. Unipolar electric motors Faraday and Barlow//Potential. – 2010. - № 3. - S. 62-68.
5. Mayer V.V. Unipolar electric motor and fundamental laws of physics//Potential. - 2010. - № 5. - S. 67-73.
6. Malygin V.M. Spatial geometry of electrical and magnetic circuits and the principle of operation of bipolar and unipolar DC electric machines//Electrics. – 2007. - № 9. - S. 28-32.
7. Menaker K.V., Yakovlev D.A., Vostrikov M.V. Improving the efficiency of power supply systems for oil consumers//Izvestia Trans-Siberian Railway. – 2018. - NO. 2 (34) - S. 85-94.
8. Popov V.P. Fundamentals of chain theory. Textbook for universities. - 3rd ed., Model. - M.: Higher School, 2000-575 p.
9. Shcherbakov A.V. High-voltage high-frequency unipolar switch based on electron beam valve//Electrical engineering. Electric power industry. Electrical industry. - 2009. - № 1. - S. 34-38.

Информация об авторах

Менакер Константин Владимирович – доцент кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: menkot@mail.ru

Савченко Павел Владимирович – доцент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктуры» Российского университета транспорта, г. Москва, e-mail: pauls7@mail.ru

Author

Menaker Konstantin Vladimirovich - Associate Professor of the Department of Electricity Supply at the Trans-Baikal Institute of Railway Transport, Chita, e-mail: menkot@mail.ru

Savchenko Pavel Vladimirovich - Associate Professor of the Department of Transport Infrastructure Management System at the Russian University of Transport, Moskva, e-mail: pauls7@mail.ru

Для цитирования

Менакер К.В. Исследование режима самовозбуждения колебательного контура на основе короткозамкнутой длинной линии [Электронный ресурс] / К.В. Менакер, П.В. Савченко // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2021. – №1(11). – Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/111-21>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

For citation

Menaker K.V., Savchenko P.V. Investigation of the self-excitation mode of the oscillatory circuit based on a short-circuited long line [Electronic resource] *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Young science of Siberia: electronic scientific journal]*, 2021, no. 1(11).