

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ПРИБОРОВ МОНИТОРИНГА И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПОЧКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Для организации питания приборов мониторинга и учета электрической энергии для железнодорожных тяговых сетей постоянного тока может быть использована топология источника питания на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения. В работе рассмотрена разработка методики для электрического расчета такого источника, в процессе которой были сформированы перечни исходных данных и результатов расчетов, предложена схема замещения из идеальных элементов, проанализирована работа схемы замещения при помощи метода «эквивалентного источника», а также представлены формулы и рекомендации для выбора и определения требуемых параметров. Адекватность предлагаемой методики подтверждена натурным экспериментом.

Ключевые слова: источник питания, тяговая сеть, прибор мониторинга, прибор учета, высокое входное напряжение.

Введение. Устойчивая тенденция повышения весовых норм поездов, наблюдающаяся на всей сети железных дорог ОАО «РЖД» [1], приводит к увеличению технических потерь электроэнергии на тягу поездов, что заставляет внедрять новые пути диагностики системы тягового электроснабжения. Одним из них является использование автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса (АСМЭПП) [2], производящей синхронные измерения показателей электроэнергии [3]. Применение специальных программных решений для обработки полученных данных [4] позволяет создавать рекомендации, практическая реализация которых приводит к повышению энергетической эффективности системы тягового электроснабжения [5].

Таким образом, АСМЭПП является эффективной диагностической системой, а разработка способов дальнейшего повышения ее эффективности является актуальной задачей. Одним из наиболее перспективных путей совершенствования блоков измерения АСМЭПП является замена источников питания от сети собственных нужд на источники, питающиеся от тяговой сети. Для этого, используя известное устройство [6] в качестве прототипа, с участием автора было разработано специальное схемотехническое решение [7], защищенное патентами [8–10], позволяющее построить источник питания приборов мониторинга и учета электроэнергии, питающийся от тяговой сети постоянного тока напряжением 3,3 кВ. Практическая реализация такого источника требует выполнения его электрического расчета, методика которого приводится далее.

Структурная схема схемотехнического решения, предложенного в [7], представлена на рис. 1. Напряжение тяговой сети поступает на клеммы 1 и 2 и через резистор R подается на цепочку из l соединенных последовательно по входам гальванически изолированных преобразователей постоянного напряжения в постоянное напряжение $P_1 - P_n$, причем входы каждого из них зашунтированы стабилитронами $VD_1 - VD_n$, выполняющими функции ограничения входного напряжения преобразователей. Выходы преобразователей так же соединены последовательно и подключены к выходным клеммам 3 и 4 устройства. Использование цепочки преобразователей напряжения, в сравнении с одиночным преобразователем, позволяет поднять величину напряжения, на котором осуществляется преобразование электроэнергии, что ведет к снижению входного тока и, как следствие, снижает выделение тепла на резисторе R и повышает КПД всего источника.

Для разработки методики электрического расчета необходимо определить, что будет являться начальными условиями для расчета и какие величины необходимо рассчитать. При этом начальные условия можно условно разделить на неизменяемые, которые формируются внешними факторами и техническим заданием, и изменяемые, которые определяются разработчиком в процессе про-

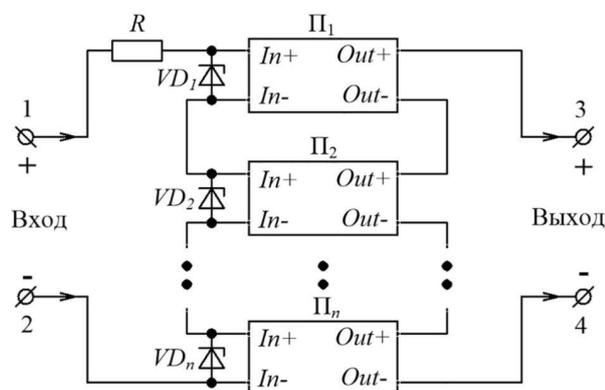


Рис. 1. Источник питания от тяговой сети постоянного тока на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения

ектирования и могут меняться много раз. Список начальных условий для расчета представлен в табл. 1. Результаты, которые необходимо получить в результате расчета, представлены в табл. 2.

Таким образом, задачей разработки методики расчета является создание расчетных формул либо

иных способов, при помощи которых из данных табл. 1 возможно получить величины табл. 2.

Теория. Для анализа электрических процессов структурную схему источника питания удобно представить электрической схемой, состоящей из идеальных элементов, показанной на рис. 2. Напряжение тяговой сети здесь представлено источником напряжения $U_{вх}$, цепочка стабилитронов $VD_1 - VD_n$ заменена на единственный стабилитрон VD , напряжение стабилизации которого $U_{ст_VD}$ является суммой напряжений стабилизации всех стабилитронов $VD_1 - VD_n$, а цепочка преобразователей напряжения вместе с нагрузкой представлена нелинейным сопротивлением $R_{нз}$.

Одним из способов электрического расчета подобных схем, содержащих нелинейные элементы, является метод «эквивалентного источника» [11], согласно которому можно разделить схему на источник напряжения и нагрузки, построить графики источника и нагрузок в базисе тока и напряжения источника, после чего совместно графическим и аналитическим способом определить требуемые величины. В нашем случае, разбивая схему на отдельные ветви, вводя соответствующие токи I_1, I_2, I_3 и выделяя напряжение «эквивалентного источника» U приходим к графикам, представленным на рис. 3.

Таблица 1

Перечень начальных условий для расчета

Наименование параметра	Тип параметра	Обозначение для расчетов	Единицы измерения
Минимальное входное напряжение источника	Неизменяемый	$U_{вх_min}$	В
Максимальное входное напряжение источника	Неизменяемый	$U_{вх_max}$	В
Выходная мощность источника	Неизменяемый	$P_{вых}$	Вт
Количество преобразователей $\Pi_1 - \Pi_n$	Изменяемый	n	шт.
КПД каждого из преобразователей $\Pi_1 - \Pi_n$	Изменяемый	$\eta_{пр}$	—

Таблица 2

Перечень результатов расчета

Наименование параметра	Обозначение для расчетов	Единицы измерения
Номинальная выходная мощность каждого из преобразователей $\Pi_1 - \Pi_n$	$P_{вых_пр}$	Вт
Входное напряжение каждого из преобразователей $\Pi_1 - \Pi_n$	$U_{вх_пр}$	В
Тепловая мощность потерь каждого из преобразователей $\Pi_1 - \Pi_n$	$P_{п_пр}$	Вт
Максимальное напряжение между первичными и вторичными цепями преобразователей $\Pi_1 - \Pi_n$	$U_{из_пр}$	В
Напряжение стабилизации каждого из стабилитронов $VD_1 - VD_n$	$U_{ст}$	В
Максимальная мощность тепловых потерь каждого из стабилитронов $VD_1 - VD_n$	$P_{п_ст}$	Вт
Сопротивление резистора R	R	Ом
Максимальная мощность тепловых потерь резистора R	$P_{п_R}$	Вт
Максимальное напряжение на резисторе R	$U_{R_макс}$	В
Мощность потерь источника	$P_{пот}$	Вт
КПД источника	$\eta_{ист}$	—

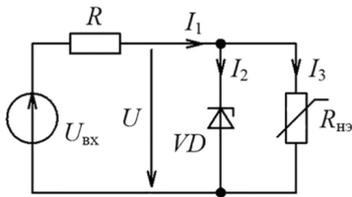


Рис. 2. Электрическая схема источника питания из идеальных элементов

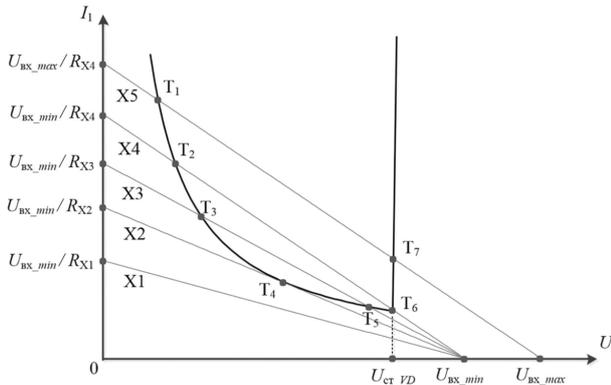


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики источника питания из идеальных элементов

Нагрузкой «эквивалентного источника», состоящего из включенных последовательно элементов $U_{вх}$ и R , являются элементы VD и $R_{нз}$, включенные параллельно. Характеристика нагрузки состоит из двух ветвей. Левая ветвь, на которой расположены точки $T_1 - T_6$, определяется характеристиками $R_{нз}$ и является кривой равной мощности, определяемую соотношением $I_1 \cdot U = P_{в\text{ых}} / \eta_{пр}$. Такое соотношение формируется свойствами преобразователей напряжения, которые, поддерживая свое выходное напряжение неизменным при работе на постоянную нагрузку, по сути, поддерживают входную потребляемую мощность на постоянном уровне. Правая ветвь формируется характеристикой стабилитрона VD и, в идеальном случае, представляет собой вертикальную прямую с абсциссой $U_{ст_вд}$. На этой прямой располагаются точки T_6 и T_7 , причем точка T_6 является общей для обеих ветвей характеристики.

Характеристика «эквивалентного источника» представляет собой отрезок прямой с отрицательным наклоном и, в общем случае, может иметь пять вариантов пересечения с характеристикой нагрузки, представленных на рисунке линиями $X1 - X5$.

Если выбрать сопротивление резистора R большим, характеристика «источника» и нагрузок не пересекутся. На рис. 3 при $R = R_{X1}$ характеристика $X1$ лежит ниже кривой нагрузки, что говорит о том, что мощность «эквивалентного источника» меньше потребной мощности его нагрузок, и работа схемы в таком режиме невозможна. Уменьшение сопротивления резистора до значения R_{X2} наклоняет отрезок прямой (характеристика $X2$), в результате чего появляется точка касания T_4 , в которой мощность источника станет достаточной для питания нагрузок. Теоретически работа в этой точке возможна, но только при условии, если цепочка будет

состоять из единственного преобразователя, либо если все преобразователи $\Pi_1 - \Pi_n$ будут обладать одинаковыми характеристиками. Реальные преобразователи всегда имеют технологический разброс параметров, что вызовет различие их входных токов и, как следствие, различие напряжений на их входах. Это приведет к разбалансировке цепочки, что, при определенных обстоятельствах, нарушит работу схемы, поэтому режим с $R = R_{X2}$ для работы использовать нельзя. Дальнейшее уменьшение сопротивления до значения $R = R_{X3}$ формирует характеристику $X3$, которая пересекает кривую нагрузки в двух точках T_3 и T_5 . Эта характеристика так же является нерабочей, поскольку для нее так же справедливо несбалансированное состояние схемы с той лишь разницей, что из двух точек схема будет всегда стремиться находиться в «правой» точке, в данном случае в T_5 . Это происходит из-за особенностей входных цепей преобразователей напряжения, содержащих электролитические конденсаторы на входе, которые накапливают энергию посредством увеличения напряжения, а не тока. Уменьшение сопротивления до значения $R = R_{X4}$ приводит к формированию характеристики $X4$ и появлению точек T_2 и T_6 , причем по тем же причинам рабочей будет точка T_6 . В реальной схеме в этой точке включатся в работу стабилитроны $VD_1 - VD_n$, которые будут ограничивать напряжения на входах преобразователей, тем самым балансируя работу схемы. Этот режим является рабочим и именно точку T_6 следует использовать для расчета сопротивления R , используя характеристику $X4$, построенную для условия $U = U_{вх_min}$. Увеличение входного напряжения вплоть до значения $U = U_{вх_max}$ при неизменном $R = R_{X4}$ приведет к возникновению характеристики $X5$ и точек пересечения T_1 и T_7 , причем в рабочей точке T_7 стабилитроны так же будут включены в работу, обеспечивая стабильное функционирование схемы.

Опустив процесс вывода формул в соответствии с известными правилами расчета электрических цепей [12], предлагается следующая последовательность расчетов параметров табл. 2. В первую очередь следует проверить, достаточна ли выходная мощность выбранных преобразователей по формуле:

$$P_{в\text{ых_пр}} \geq \frac{P_{в\text{ых}}}{\eta} \quad (1)$$

Если мощность недостаточна, следует использовать более мощные преобразователи либо увеличить их количество. Далее следует определить величину входного напряжения для каждого из преобразователей $U_{вх_пр}$, руководствуясь их справочной информацией. Если преобразователь допускает работу в некотором диапазоне входных напряжений, следует выбирать значение ближе к верхней границе диапазона, что положительно скажется на общем КПД проектируемого источника. При этом обязательно должно выполняться условие $U_{вх_пр} \cdot n < U_{вх_min}$, в противном случае следует либо уменьшить n , либо уменьшить $U_{вх_пр}$.

Тепловая мощность потерь каждого из преобразователей $\Pi_1 - \Pi_n$ вычисляется по формуле:

$$P_{п_пр} = P_{в\text{ых_пр}} \left(\frac{1}{\eta_{пр}} - 1 \right) \quad (2)$$

Максимальное напряжение между первичными и вторичными цепями преобразователей $\Pi_1 - \Pi_n$, при условии наличия гальванической связи между клеммами 2 и 4 источника [7], рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{из_пр}} = U_{\text{вх_пр}} \cdot n. \quad (3)$$

Напряжение стабилизации каждого из стабилизаторов $VD_1 - VD_n$ следует принять равным входному напряжению преобразователей $U_{\text{вх_пр}}$:

$$U_{\text{ст}} = U_{\text{вх_пр}}. \quad (4)$$

Максимальная мощность тепловых потерь каждого из стабилизаторов $VD_1 - VD_n$ рассчитывается исходя из работы источника при максимальном входном напряжении без нагрузки на выходе:

$$P_{\text{п_ст}} = \frac{U_{\text{ст}}(U_{\text{вх_max}} - U_{\text{ст}} \cdot n)}{R}. \quad (5)$$

Но прежде следует выбрать значение сопротивления резистора R из соотношения:

$$R \leq \frac{(U_{\text{вх_min}} - U_{\text{ст}} \cdot n) \cdot U_{\text{ст}} \cdot n \cdot \eta_{\text{пр}}}{P_{\text{вых}}}. \quad (6)$$

Максимальная мощность тепловых потерь резистора R рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{п_R}} = \frac{(U_{\text{вх_max}} - U_{\text{ст}} \cdot n)^2}{R}. \quad (7)$$

При этом максимальное напряжение на резисторе R :

$$U_{R_max} = U_{\text{вх_max}} - U_{\text{ст}} \cdot n. \quad (8)$$

Мощность потерь всего источника определяется по формуле:

$$P_{\text{пот}} = \frac{(U_{\text{вх_max}} - U_{\text{ст}} \cdot n) \cdot U_{\text{вх_max}}}{R} - P_{\text{вых}}. \quad (9)$$

А КПД всего источника рассчитывается по формуле:

$$\eta_{\text{ист}} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вых}} + P_{\text{пот}}}. \quad (10)$$

Практика. Для проверки адекватности по представленной методике был рассчитан и построен экспериментальный источник питания с выходной мощностью 5 Вт на основе четырех обратноходовых преобразователей напряжения [13], внешний вид которого представлен на рис. 4.

Высоковольтный резистор R был выполнен из соединенных последовательно резисторов MF-200, имеющих, согласно расчету, суммарное сопротивление 242 КОм. Входное напряжение каждого преобразователя было выбрано на уровне 300 В, соответственно, в качестве каждого из стабилизаторов было использовано по три стабилизатора 1N5378В с напряжением стабилизации 100 В, включенных

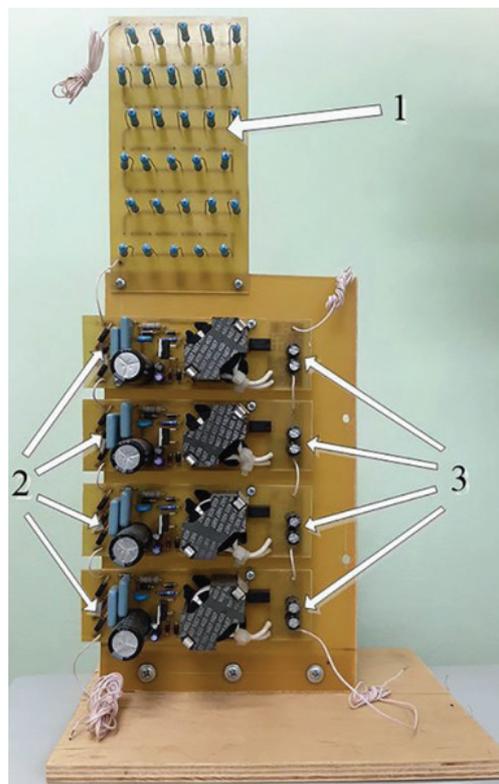


Рис. 4. Экспериментальный источник питания на основе четырех обратноходовых преобразователей напряжения:
1 — входной высоковольтный резистор;
2 — стабилизаторы;
3 — преобразователи напряжения

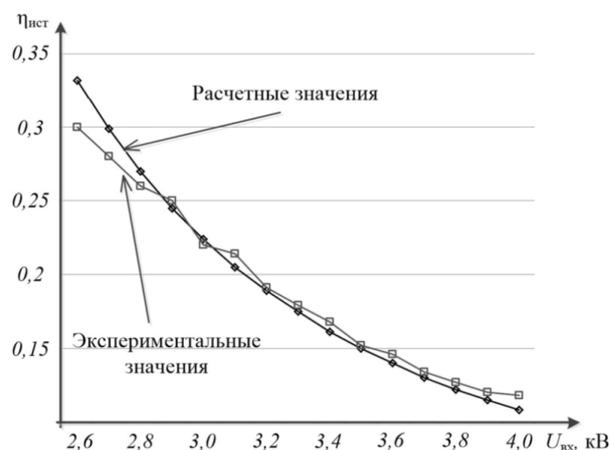


Рис. 5. Кривые расчетных и экспериментальных значений КПД экспериментального источника питания

последовательно. Преобразователи напряжения были выполнены на основе типовых микросхем TOP254YN, для повышения допустимого напряжения между их входами и выходами были использованы высоковольтные оптотранзисторы CNY64A и специальные преобразовательные трансформаторы. КПД каждого из преобразователей при входном напряжении 300 В, определенный экспериментально, составил 0,72. Экспериментальные исследования, произведенные с применением высоковольтной лабораторной установки [14] в диапазоне напряжения 2600–4000 В, показали соот-

ветствие расчетных и практических характеристик, что подтверждает адекватность представленной методики расчета. В частности, на рис. 5 приведены кривые расчетных и экспериментальных значений КПД источника питания в зависимости от величины входного напряжения. Присутствующее на графике незначительное расхождение кривых можно объяснить погрешностями измерения и отличиями характеристик реальных элементов, в частности стабилизаторов, от их идеальных моделей.

Заключение. Представленная методика электрического расчета может быть использована при создании источников питания на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения, питающихся от высокого постоянного напряжения, в частности от железнодорожной тяговой сети постоянного тока напряжением 3,3 кВ. При этом следует учитывать, что представленный источник питания обладает сравнительно низким КПД, что необходимо учитывать при проектировании питаемого им оборудования. Так, использование схемотехнических приемов, снижающих мощность оборудования, потребляемую от источника питания, позволит значительно уменьшить величину тепловых потерь источника, что положительно скажется на массе и габаритах конечного изделия.

Библиографический список

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. Москва: ОАО «РЖД», 2016. 76 с.
2. Черемисин В. Т., Ушаков С. Ю., Пашков Д. В., Никифоров М. М. Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. 2015. № 3. С. 45–49.
3. Каштанов А. Л., Пашков Д. В. Применение синхронных измерений на тяговых подстанциях и электроподвижном составе при анализе эффективности систем автоведения // Научные исследования и их практическое применение. Социальные и пути развития: сб. науч. тр. SWorld. Одесса, 2014. Т. 7, № 3 (36). С. 37–41.
4. Никифоров М. М., Плотников Ю. В. Экспериментальная оценка потерь электроэнергии в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций постоянного тока за счет применения АСУЭ ФКС // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы Второй всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2016. С. 234–241.
5. Черемисин В. Т., Каштанов А. Л., Никифоров М. М. Повышение энергетической эффективности электротяги при внедрении мониторинга электроэнергии на фидерах контактной сети // Транспорт Урала. 2015. № 2 (45). С. 67–70.
6. Пат. 19327 Российская Федерация, МПК G 01 R 22/00 (2000.01). Счетчик электрической энергии постоянного тока для подвижного состава железнодорожного транспорта / Павлов Л. Н., Корбут А. А., Щедрин Н. Л., Белов Ю. И. № 2001102415/20; заявл. 25.01.01; опубл. 20.08.01. 8 с.

7. Плотников Ю. В. Источник питания приборов мониторинга и учета электроэнергии тяговой сети постоянного тока на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 50–54.

8. Пат. 189408 Российская Федерация, МПК H 02 M 3/155 (2006.01). Устройство электропитания приборов мониторинга и учета электрической энергии тяговой сети железных дорог постоянного тока / Черемисин В. Т., Плотников Ю. В., Никифоров М. М. № 2019102754; заявл. 10.01.19; опубл. 22.05.19. Бюл. № 15. 5 с.

9. Пат. 188203 Российская Федерация, МПК H 02 M 3/00 (2006.01). Устройство электропитания приборов мониторинга и учета электрической энергии тяговой сети железных дорог постоянного тока / Никифоров М. М., Плотников Ю. В., Черемисин В. Т. № 2018132891; заявл. 14.09.18; опубл. 03.04.19. Бюл. № 10. 5 с.

10. Пат. 192722 Российская Федерация, МПК H 02 M 3/155 (2006.01). Устройство электропитания приборов мониторинга электрической энергии тяговой сети железных дорог постоянного тока / Лаврухин А. А., Никифоров М. М., Окишев А. С., Плотников Ю. В., Черемисин В. Т. № 2019121096; заявл. 03.07.19; опубл. 27.09.19, Бюл. 27. 7 с.

11. Горюнов В. Н., Дед А. В., Кошук Г. А. Методы расчета электрических цепей, содержащих нелинейные элементы // Динамика систем, механизмов и машин. 2012. № 1. С. 113–117.

12. Шашеро В. Г., Селезнев В. В., Пилипенко А. С. Метод, основанный на использовании законов Кирхгофа, как универсальный метод расчета электрических цепей // Теория и практика современной науки. 2017. № 11 (29). С. 385–389.

13. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. 3-е изд., стер. Москва: Додэка-XXI, 2011. 528 с. ISBN 978-5-94120-254-6.

14. Плотников Ю. В. Экспериментальная лабораторная установка для исследования блоков питания измерителей параметров тяговой сети постоянного тока 3,3 кВ // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. С. 14–20.

ПЛОТНИКОВ Юрий Викторович, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог».

SPIN-код: 4808-6390

Адрес для переписки: ra9mjr@mail.ru

Для цитирования

Плотников Ю. В. Методика расчета источника питания приборов мониторинга и учета электроэнергии тяговой сети постоянного тока на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 41–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-41-45.

Статья поступила в редакцию 09.02.2021 г.

© Ю. В. Плотников