

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ,  
ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ**

УДК 621.316.9.

*Р.Б. Тентиев, [renattentiev@mail.ru](mailto:renattentiev@mail.ru)**Н.К. Джусупбекова [nazika11612@mail.ru](mailto:nazika11612@mail.ru)**А.К. Асанов, [asanov\\_ak@mail.ru](mailto:asanov_ak@mail.ru)**Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ ПС 110/35/10 КВ "ПАРКОВАЯ"**

Статья содержит экспериментально-расчетное определение электромагнитной обстановки ПС 110 кВ «Парковая», расположенной в южной окраине г. Бишкек. На основе измеренных данных произведен расчет и моделирование параметров электромагнитной совместимости основного оборудования с системами вторичной коммутации. Произведены измерения удельных электрических сопротивлений грунта и сопротивления растеканию заземляющего устройства, на основе которых при коротких замыканиях и молниевом разряде определены опасности воздействия разностей потенциалов на вторичное оборудование. Произведен расчет среднего количества разряда молнии на территорию объекта. Произведен анализ и оценка состояния заземляющего устройства, сечений и коррозионного состояния элементов существующего заземляющего устройства, размещений вторичных цепей. Произведен анализ системы молниезащиты по условиям воздействия на микропроцессорную аппаратуру и на вторичное оборудование. Оценка результатов расчета сопоставлена с требованиями нормативно-технической документации.

**Ключевые слова:** заземляющее устройство, удельное электрическое сопротивление грунта, сопротивление растеканию заземляющего устройства, импульсное сопротивление, импульсный коэффициент, вторичные цепи, короткое замыкание, молниезащита.

**Введение**

В современных условиях состоянию заземляющего устройства и системы молниезащиты должно уделяться повышенное внимание, поскольку они оказывают существенное влияние на электромагнитную обстановку на объекте. Устройства РЗА, АСУ ТП, АСКУЭ и связи, основанные на микропроцессорных элементах, имеют широкие функциональные возможности и ряд других преимуществ перед электромеханическими устройствами. Однако, в отличие от них, современные устройства обладают сравнительно высокой чувствительностью к электромагнитным помехам. Энергообъекты (ПС, ТЭЦ, ГЭС, и т.п.) являются мощными источниками электромагнитных полей и помех, поэтому для нормального функционирования современных устройств защиты и автоматики необходимо обеспечивать их электромагнитную совместимость (ЭМС) с электромагнитной обстановкой (ЭМО) на энергообъектах. Система заземления играет важную роль в обеспечении ЭМС-аппаратуры защиты, автоматики, управления, связи [1, 4-7].

Таким образом, необходимо проводить обследование систем заземления и уравнивания потенциалов на действующих энергообъектах для обеспечения электробезопасности и ЭМС. По результатам должны разрабатываться мероприятия по модернизации заземляющих устройств.

**Целью настоящей работы** является обследование существующего контура заземляющего устройства ПС 110/35/10 кВ «Парковая» с выявлением нарушения электромагнитной обстановки в части влияния на надежность работы первичного оборудования и систем вторичной коммутации.

**Краткие сведения об объекте**

Объект расположен на южной окраине г. Бишкек. ПС «Парковая» является понижающей подстанцией, осуществляющей прием, преобразование и передачу

электрической энергии. ПС эксплуатируется с постоянным дежурным персоналом на объекте.

Измерения производились на объекте в апреле 2023 г. При выполнении работ использовались следующие документы [3]: - нормальная схема электрических соединений ПС «Парковая» на 2023 год; - журнал уставок РЗА; - документ «Токи короткого замыкания на шинах 6–500 кВ подстанций Национальной электрической сети Кыргызстана (НЭСК) в максимальных и минимальных режимах по состоянию на 2021 г.».

ПС имеет три распределительных устройства напряжением выше 1 кВ: ОРУ-110 кВ, выполнено по схеме с двумя системами сборных шин; ЗРУ-35кВ и РУ-10 кВ, выполненные в виде ЗРУ-10 кВ – 1СШ, КРУН-10 кВ – 2СШ. На ПС установлены два силовых трансформатора мощностью Т1 – 40 МВА и Т2 – 25 МВА напряжением 110/35/10 кВ. Питание собственных нужд осуществляется от щита собственных нужд (ЩСН) 0,4 кВ, расположенного в здании ОПУ. ЩСН получает питание от трансформатора собственных нужд ТСН-1 (1СШ, 250 кВА) и ТСН-2 (2СШ, 250 кВА), установленных один на улице, другой – в помещении ОПУ. Питание постоянным током осуществляется от аккумуляторной, расположенной в здании ОПУ. От ПС отходят 6 ВЛ 110 кВ, а также КЛ 10-35 кВ.

## 1. Результаты измерений и расчетов.

### Оценка сечений и коррозионного состояния элементов существующего ЗУ

Согласно [4], контролировалось сечение и коррозионное состояние элементов ЗУ. Результаты обследования коррозионного состояния ЗУ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сечение и коррозионное состояние заземлителей

Место	Материал	Форма	Сечение, мм <sup>2</sup>	Коррозия (% от сечения)	Эффективное сечение, мм <sup>2</sup>	Нагрев при КЗ, °С	Критерий по [1, п. 1.7.111-112]	Итог
ОРУ 110 кВ	Сталь	Круг Ø20 мм	314	5-20	251	72	400°С	Удовл.

### Оценка удельного электрического сопротивления грунта

По результатам измерения и обработки данных вертикального электрического зондирования с помощью программы *iri2win* получена двухслойная модель грунта с удельным сопротивлением в летний период 1670 Ом·м, глубже 8 м – 777 Ом·м.

С целью учета промерзания грунта в зимний период для данного типа грунта и географического района расположения объекта, согласно таблице П.3.2 [4], для зимнего периода принимается трехслойная модель грунта с удельным сопротивлением  $\rho_1$  – 2100 Ом·м,  $h_1$  – 1,5 м;  $\rho_2$  – 1670 Ом·м,  $h_2$  – 6,5 м;  $\rho_3$  – 900 Ом·м.

### Расчет сопротивлению растекания заземляющего устройства подстанции

На основании паспортных данных ЗУ была составлена расчетная модель ЗУ ПС, представленная на рисунке 1.

Модель ЗУ учитывает:

- горизонтальные заземлители,
- вертикальные заземлители,
- молниеотводные мачты и молниеприемники на порталах,
- алюминиевые и медные экраны кабеля,
- элементы СУП ОПУ.

#### Исходные данные:

1. План размещения заземляемого оборудования – территория ЗУ подстанции занимает площадь  $S = 11250 \text{ м}^2$ .

2. Сведения о грунте – модель для двуслойного грунта с удельными сопротивлениями верхнего и нижнего слоев земли  $\rho_1 = 1670 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_2 = 777 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Мощность верхнего слоя грунта  $h = 8 \text{ м}$ .

3. Сведения о естественных заземлителях.

а) в качестве естественного заземлителя будет использоваться система «трос-опоры» двух подходящих к подстанции ЛЭП напряжением 110 кВ на металлических опорах с длиной пролета  $l = 250 \text{ м}$ . Каждая линия имеет один стальной грозозащитный трос сечением  $s = 50 \text{ мм}^2$ .

Сопротивление заземления опор воздушных линий для выбранного типа грунта не должно превышать 30 Ом (ПУЭ 2.5.129, табл. 2.5.19). Принимаем  $r_{оп} = 30 \text{ Ом}$ .

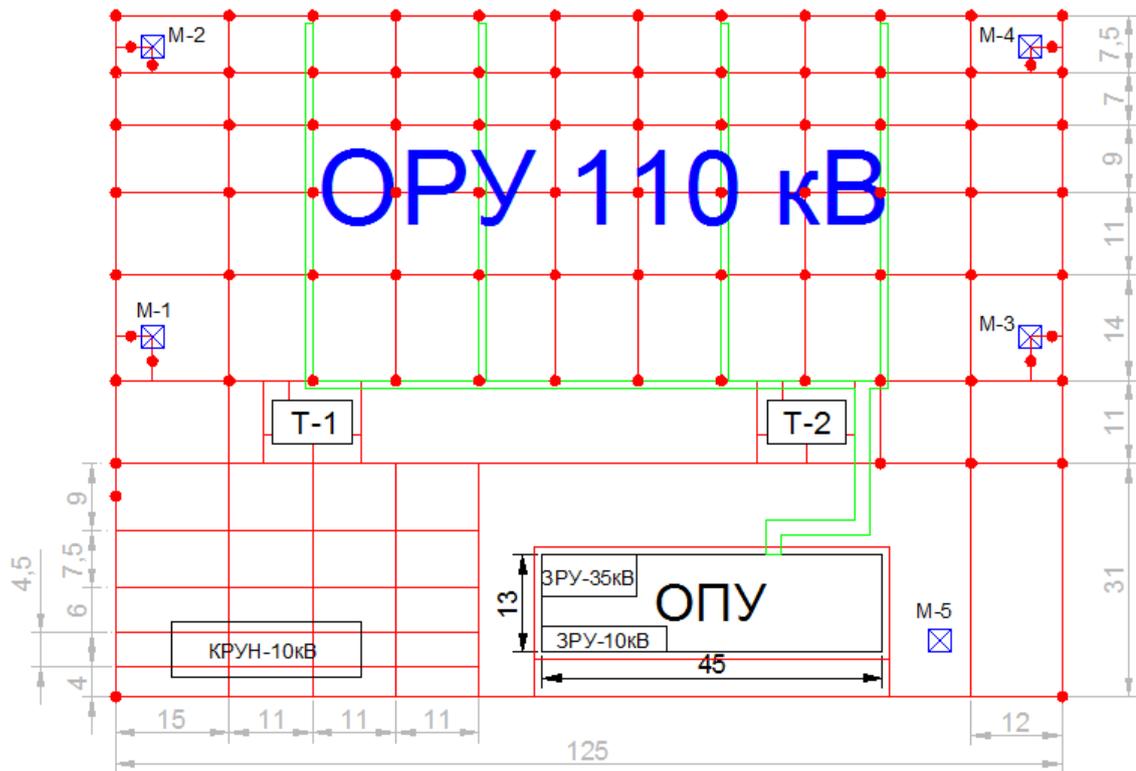
$$R_{E1} = 30 \text{ Ом},$$

б) в качестве естественного заземлителя использовалось сопротивление (измеренные значения) брони кабелей 10 кВ:

$$R_{E2} = 21,3 \text{ Ом}.$$

4. Ток короткого замыкания на землю в сети напряжением 110 кВ принимался равным  $I_{кз} = 19,8 \text{ кА}$  [3].

5. Заземлитель выполнен из горизонтальных  $\varnothing 20 \text{ мм}$  электродов и вертикальных стержневых электродов длиной  $l_b = 2,5 \text{ м}$ . Глубина заложения электродов в землю  $t = 1 \text{ м}$ .



Условные обозначения:

-  – Мачта освещения
-  – Горизонтальные заземлители
-  – Вертикальные заземлители
-  – Лотки с вторичными цепями

Рисунок 1 – Расчетная модель ЗУ с планом размещения основного оборудования и вторичных цепей

Расчет сопротивления заземляющего устройства подстанции проводился методом наведенных потенциалов для двухслойной структуры грунта.

Результаты расчетов представлены ниже.

Суммарная длина горизонтальных электродов	$L_г = 3700 \text{ м}$
Количество вертикальных электродов	$n_в = 87 \text{ шт}$
Суммарная длина вертикальных электродов	$L_в = l_в \cdot n_в = 2,5 \cdot 87 = 218 \text{ м}$
Эквивалентное удельное сопротивление грунта	$\rho_э = \rho_2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^\alpha = 777 \cdot \left(\frac{1670}{777}\right)^{0,76} = 1390 \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Сопротивление искусственного заземлителя	$R_{и} = A \frac{\rho_э}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_э}{L_г + L_в}$ $= 0,414 \cdot \frac{1390}{\sqrt{11250}} + \frac{1390}{3700 + 218}$ $= 5,77 \text{ Ом}$
Сопротивление заземляющего устройства с учетом естественных и искусственных заземлителей подстанции	$R_{зу} = \frac{R_{E1} \cdot R_{E2} \cdot R_{и}}{R_{E1} \cdot R_{E2} + R_{E1} \cdot R_{и} + R_{E2} \cdot R_{и}} =$ $= \frac{30 \cdot 21,3 \cdot 5,77}{30 \cdot 21,3 + 30 \cdot 5,77 + 21,3 \cdot 5,77}$ $= 3,94 \text{ Ом}$
Сопротивление растеканию ЗУ ПС с учетом п.п. 1.7.108	$R_{зу} = R_{зу(1.7.90)} \cdot \rho_э \cdot 0,002 = 0,5 \cdot 1390 \cdot 0,002$ $= 1,39 \text{ Ом}$

Согласно [1], сопротивление растеканию ЗУ ПС не должно превосходить 0,5 Ом в любое время года с учетом естественных заземлителей. Но учитывая п.п. 1.7.108 [1] в электроустановках напряжением выше 1 кВ, а также до 1 кВ с изолированной нейтралью для земли с удельным сопротивлением более 500 Ом·м, допускается повысить требуемые настоящей главой значения сопротивлений заземляющих устройств в 0,002ρ раза, где ρ – эквивалентное удельное сопротивление земли, Ом·м. При этом увеличение требуемых настоящей главой сопротивлений заземляющих устройств должно быть не более десятикратного.

Таким образом, сопротивление растеканию ЗУ ПС не соответствует требованиям НТД. Расчет ЗУ ПС показывает, что сопротивление ЗУ ПС превышает допустимые значения на 3,94/1,39=2,8 раза.

## 2. Определение опасности коротких замыканий

Протекание через заземляющее устройство сверхтоков при КЗ на землю в сетях выше 1 кВ создает опасность воздействия разностей потенциалов на вторичное оборудование и персонал. Помимо этого, протекание тока КЗ может повреждать некоторые проводящие коммуникации (экраны кабелей и т.п.).

**Определение напряжения на заземляющем устройстве.** Напряжение на ЗУ определяют как произведение сопротивления заземляющего устройства на потенциал, повышающий ток:

$$U_{зу} = R_{зу} \cdot I_{K3} = 3,94 \cdot 19,8 = 78 \text{ кВ.}$$

Максимальный подъем потенциала на ЗУ ОРУ при КЗ в сети 110 кВ составит 78 кВ, что превысит 10 кВ, нормируемых п.1.7.89 [1].

## 3. Система молниезащиты объекта

### Анализ системы молниезащиты объекта

Система молниезащиты рассматриваемой части ОРУ-110 кВ здания ОПУ

организована прожекторными мачтами М1, М2, М3, М4, М5 высотой 30 м, установленными на отдельных мачтах ОРУ-110 кВ и рядом с ОПУ, а также грозотросами, заходящими на линейные порталы ОРУ-110 кВ. Существующая система молниезащиты обеспечивает защиту рассматриваемой части ОРУ, зданий ОПУ с надежностью 0,99 в соответствии с [6].

### Расчет среднего количества разрядов молнии на территорию объекта за год

Поражение объекта молнией носит вероятностный характер и зависит от характеристик грозовой активности в регионе, геометрических параметров рассматриваемого объекта и характеристик окружающей местности. Поэтому выбор принимаемого в расчетах значения тока молнии будет определяться ожидаемым средним числом поражений объекта за год.

Рассматривается поражение молнией всей территории объекта.

Расчет количества молниевых разрядов выполняется в соответствии с методикой МЭК 62305-2 «Молниезащита» (International Standard IEC 62305 Protection Against Lightning) [8], что допускается СО-153-34.21.122-2003.

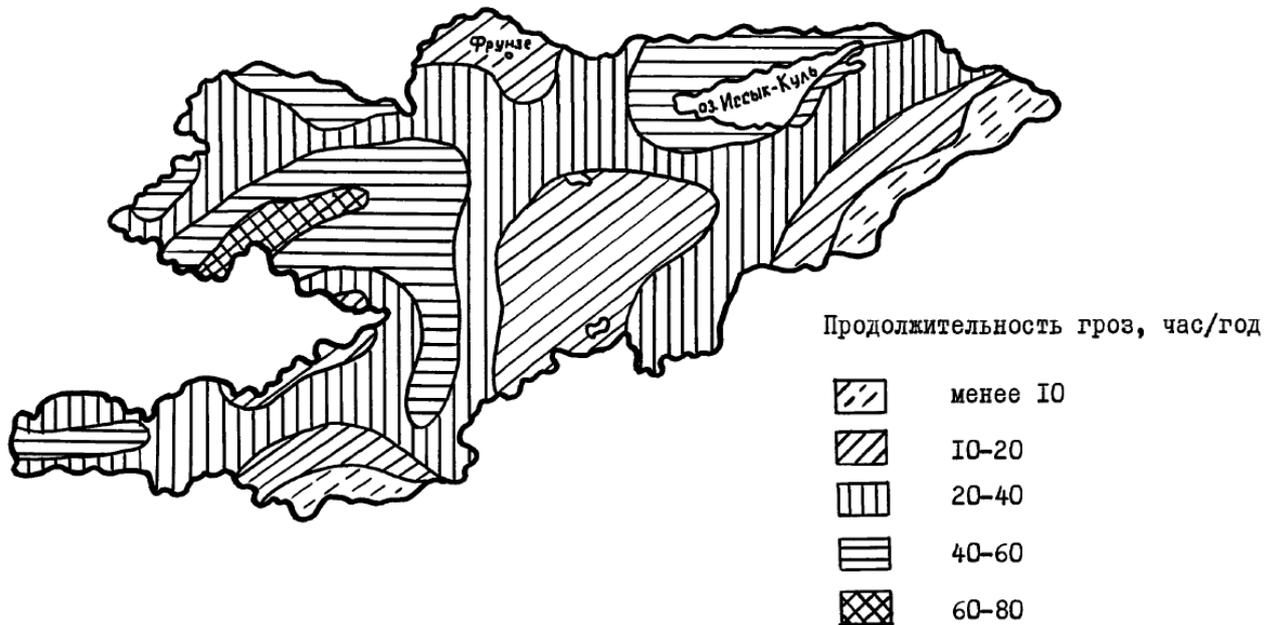


Рисунок 2 – Карта среднегодовой продолжительности гроз на территории Кыргызстана [2]

Плотность ударов молнии на  $1 \text{ км}^2$  в год по карте среднегодовой продолжительности гроз (рис. 2) составит  $N_g = 6,7 \cdot T_d / 100$ .

Если принять верхнее значение уровня грозовой активности  $T_d = 20$  часов в год, то  $N_g = 1,36$ .

Ожидаемое количество разрядов молнии в защищаемую территорию за год определяется по формуле:

$$N_D = N_g \cdot A_d \cdot C_d \cdot 10^{-6}.$$

Здесь  $A_d$  – площадь сбора разрядов для рассматриваемой территории,  $C_d$  – коэффициент, учитывающий влияние относительного местонахождения защищаемого объекта.

Вокруг ПС отсутствуют объекты равной или большей высоты, поэтому  $C_d = 1,0$ .

Площадь сбора разрядов для территории ПС определена в соответствии с International Standard IEC 62305 Protection Against Lightning.

$$A_d \approx 27200 \text{ м}^2.$$

$N_D = 0,036$ , что соответствует 1 удару в ~ 35 лет.

По данным [7], в которых приведена эмпирическая формула для оценки вероятности молниевых разрядов с той или иной величиной тока молнии, молниевые разряды с амплитудой тока 15 кА и выше будут составлять 20 % от общего числа молниевых разрядов.

С учетом ожидаемого количества поражений молнией всей открытой территории в год молниевые разряды с током молнии выше 15 кА будут происходить в среднем 1 раз в ~35 лет. Поскольку расчетное время службы устанавливаемого оборудования не превышает 30 лет, выбранное значение тока можно принять в качестве расчетного при определении ЭМО.

### Анализ системы молниезащиты по условиям воздействия на МП-аппаратуру

При ударах молнии в молниеотводы объекта возможно воздействие импульсных разностей потенциалов и наводок на вторичные цепи, а также влияние импульсного магнитного поля непосредственно на аппаратуру. С целью выявления средств молниезащиты, представляющих опасность для вторичного оборудования, произведен предварительный анализ расположения элементов молниезащиты.

Импульсное сопротивление контура заземления может быть рассчитано через его стационарное сопротивление и импульсный коэффициент:

$$R_u = \alpha_u R$$

где  $\alpha_u$  – импульсный коэффициент

$I_M = 15 \text{ кА}$ – ток молнии [7] $\rho = 1670 \text{ Ом/м}$ – удельное сопротивление грунта $S = 11250 \text{ м}^2$ – площадь заземлителя	$\alpha_u = \sqrt{\frac{1500 + \sqrt{5}}{(\rho + 320)(I_M + 45)}} = 1,15$
импульсное сопротивление контура заземления	$R_{\text{имп}} = \alpha_u * R = 1,15 * 3,94 = 4,54 \text{ Ом}$

### Анализ системы молниезащиты по условиям воздействия на вторичное оборудование

Список элементов системы молниезащиты, протекание тока молнии через которые представляет наибольшую опасность для первичного оборудования и систем вторичной коммутации, представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Элементы системы молниезащиты, представляющие наибольшую опасность для вторичных цепей

ЭСМЗ, представляющие наибольшую опасность	Обоснование
М5	Близкое расположение молниеотводов от ЭА, трасс прокладки вторичных цепей и помещений с МП-аппаратурой

Следует отметить, что в случае разряда молнии в любой из элементов СМЗ, с расположенным на нем осветительным оборудованием, возможно повреждение изоляции кабелей питания прожекторов. В результате пробоя изоляции часть тока молнии будет растекаться по проводникам кабелей питания прожекторов к ЩСН в здании ОПУ. Импульсная помеха через ЩСН будет поступать на входы аппаратуры, питаемой переменным током (например, выпрямительные устройства АБ), что может привести к выходу ее из строя.

### **Заключение**

Электромагнитную обстановку на ПС 110 кВ «Парковая» следует считать неблагоприятной по условиям обеспечения ЭМС МП-аппаратуры.

Существующая схема контура ЗУ ПС соответствует требованиям НТД.

Сечение и материал заземлителей и заземляющих проводников удовлетворяют требованиям НТД (в том числе по условиям нагрева при КЗ).

Система уравнивания потенциалов в помещении здания ОПУ соответствует требованиям НТД.

Удельное сопротивление грунта в месте расположения объекта является неблагоприятным по условиям растекания тока с заземлителей в летний и зимний периоды.

Сопротивление растеканию ЗУ ПС не удовлетворяет требованиям нормативных значений и превышает нормированную в 2,8 раза.

Разности потенциалов на промышленной частоте при КЗ в сетях выше 1 кВ будут представлять опасности для МП-аппаратуры и ее вторичных цепей.

Помехи и перенапряжения при молниевом разряде в элементы СМЗ будут представлять опасность как для МП-аппаратуры, так и для вторичных цепей.

### **Литература**

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
2. Чичинский М.И. Особенности грозопоражаемости в горных районах и их учет при выборе грозозащиты воздушных линий электропередачи: дис.... на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чичинский М.И. – Фрунзе, 1984г.
3. Данные ОАО «Национальная электрическая сеть Кыргызстана» с 2012 по 2023 г.
4. Методические указания по контролю заземляющих устройств электроустановок. РД 153-34.0-20.525-00, М. СПО ОРГРЭС, 2000.
5. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. – М. Энергоатомиздат, 1983.
6. Методические указания по определению электромагнитной обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. СО 34.35.311-2004. – М.: Издательство МЭИ, 2004.
7. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. СТО-56947007-29.240.044-2010.
8. IEC 62305 Lightning Protection (МЭК 62305 Молниезащита).
9. Асанов, А. К. Экспериментально-расчетное определение электромагнитной обстановки ПС 110 кВ "Ананьево" / А. К. Асанов, А. А. Омоеева // Проблемы автоматизации и управления. – 2022. – № 3(45). – С. 42-51. – EDN CFPPFA.