



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ
ЗАЩИТЫ**

**MATERIALS AND EQUIPMENT
FOR CORROSION PROTECTION**

doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.104.2-1

**Оптимальное регулирование работы станции катодной защиты
на основании показателей надежности и остаточного ресурса**

Д.А. Васин¹, А.И. Шеферов², С.А. Никулин^{2✉}, Е.Л. Карнавский², Л.А. Косарева³

¹АО «Гипрогазцентр»,
РФ, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Алексеевская, д. 26

²АО «Газпром проектирование»,
РФ, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Алексеевская, д. 26

³ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород»,
РФ, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Звездинка, д. 11

e-mail: s.nikulin@ggc.nnov.ru, snikulin@gazpromproject.ru

Аннотация. Коррозия стальных подземных трубопроводов значительно снижает срок службы, приводя их к аварийному состоянию, при котором дальнейшая эксплуатация невозможна. Основными методами защиты всех трубопроводов являются изоляционные покрытия и электрохимическая защита.

Определение оптимальных параметров работы системы электрохимической защиты позволяет увеличить срок эксплуатации защищаемых объектов вследствие уменьшения нагрузки на рабочих объектах. Данные подходы, главным образом, направлены на снижение энергопотребления за счет определения оптимальных выходных параметров средств электрохимической защиты при условии соблюдения требований нормативной документации (НД) по допустимым значениям защитного потенциала. Однако алгоритмы оптимального регулирования напрямую не учитывают фактическое техническое состояние системы и не могут дать информацию о ее надежности.

Средний срок эксплуатации большинства существующих трубопроводов составляет более 20 лет. Фактические защитные характеристики от коррозии таких трубопроводов значительно снижены в сравнении с начальными. Ввиду чего возникает необходимость в определении надежности системы электрохимической защиты. Предлагаемые методы по определению и оценке показателей надежности систем электрохимической защиты направлены на построении Марковских моделей надежности исследуемого объекта и определении его коэффициента готовности.

Реализация алгоритмов оптимального регулирования в совокупности с методами оценки надежности систем электрохимической защиты может позволить определять время безаварийной работы и выявлять наиболее «уязвимые» элементы системы.

Ключевые слова: станция катодной защиты, анодное заземление, надежность, отказ системы, остаточный ресурс, электрохимическая защита, Марковская модель надежности, алгоритм оптимизации.

Для цитирования: Васин Д.А., Шеферов А.И., Никулин С.А., Карнавский Е.Л., Косарева Л.А. Оптимальное регулирование работы станции катодной защиты на основании показателей надежности и остаточного ресурса // Практика противокоррозионной защиты. – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 7-25. doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.104.2-1.

Статья получена: 01.03.2021, опубликована 01.06.2022.

**Optimal regulation of cathodic protection plant operation
on the basis of reliability and residual life**

D.A. Vasin¹, A.I. Sheferov², S.A. Nikulin^{2✉}, E.L. Karnavsky², L.A. Kosareva³

¹JSC «Giprogascentr»,
26, Alekseevskaya st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russian Federation

²JSC «Gazprom project»,
26, Alekseevskaya st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russian Federation

³LLC «Gazprom Transgaz Nizhny Novgorod»,
11, Zvezdinka street, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

e-mail: s.nikulin@ggc.nnov.ru, snikulin@gazpromproject.ru

Abstract. Corrosion of steel underground pipelines significantly reduces the service life, leading them to an emergency condition, in which further operation is impossible. The main methods of protecting such pipelines

are insulating coatings and electrochemical protection.

Determination of the optimal operating parameters of the electrochemical protection system allows to increase the service life of protected objects, due to a decrease in the load on working objects. These approaches are mainly aimed at reducing energy consumption by determining their optimal output parameters of electrochemical protection equipment, subject to compliance with the requirements of RD for permissible values of the protective potential. However, optimal control algorithms do not directly take into account the actual technical state of the system and cannot provide information about its reliability.

The average life of most existing pipelines is more than 20 years. The actual corrosion protection characteristics of such pipelines are significantly reduced in comparison with the initial. In view of this, there is a need to determine the reliability of the electrochemical protection system. Proposed methods for determining and evaluating the reliability indicators of electrochemical protection systems are aimed at building Markov models of the reliability of the object under study and determining its availability factor.

The implementation of optimal control algorithms in conjunction with methods for assessing the reliability of electrochemical protection systems can make it possible to determine the time of trouble-free operation and identify the most "vulnerable" elements of the system.

Keywords: cathodic protection station, anode grounding, reliability, system failure, residual life, electrochemical protection, Markov reliability model, optimization algorithm.

For citation: Vasin, D. A., Sheferov, A. I., Nikulin, S. A., Karnavsky, E. L., & Kosareva, L. A. Optimal regulation of cathodic protection plant operation on the basis of reliability and residual life. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 27(2), 7-25. doi:10.31615/j.corros.prot.2022.104.2-1.

Received: March 01, 2022. Published: June 01, 2022.

Введение

В процессе транспорта нефти и газа трубопроводы и технологическое оборудование подвергаются коррозии. Данное явление способно привести к значительному материальному и экономическому ущербу. Для защиты подземных трубопроводов от коррозии предусматривается электрохимическая защита (ЭХЗ), реализуемая за счет методов катодного смещения собственного потенциала металла трубы, и применение изоляционных покрытий, наносимых на поверхность трубопровода для ограждения стенки трубопровода от внешней среды.

Для оценки состояния защищенности трубопроводов, отслеживания снижения защитных характеристик и своевременно обнаружения коррозионных дефектов повсеместно находит свое применение система дистанционного коррозионного мониторинга (СДКМ). Эта система позволяет дистанционно отслеживать параметры защиты ЭХЗ (сила тока защиты, защитный потенциал, скорость коррозии и т.п.) и анализировать их изменение, выполнять прогноз на основе накопленной базы данных, регулировать выходные параметры станций катодной защиты (СКЗ) [1].

С течением времени происходит постепенное ухудшение состояния изоляционного покрытия трубопроводов и частичное разрушение анодного заземления (АЗ) установок катодной защиты (УКЗ). Данные

процессы влияют на работу СКЗ и приводят к изменению её выходных параметров. При этом стоит отметить, что средний возраст трубопроводов, находящихся в эксплуатации, составляет порядка 20...30 лет, а УКЗ, обеспечивающие защиту трубопровода от коррозии, либо выходят на номинальные режимы работы, либо уже работают в них. Однако, несмотря на применение современных СДКМ и реализованных с их помощью алгоритмов оптимизации режимов работы системы ЭХЗ, на данный момент отсутствуют методы, позволяющие регулировать работу ЭХЗ с учетом надежности ее отдельных элементов.

Надежность и коэффициент готовности системы ЭХЗ

В общем случае понятие «надежность» – это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [2]. Для ЭХЗ трубопровода надежность будет определяться соответствием величин защитного потенциала «труба-земля» требованиям нормативных документов (НД). Как уже отмечалось выше, отслеживание изменения величины защитного потенциала на трубопроводах выполняется при помощи систем СДКМ, в состав которых в свою очередь входят контрольно-диагностические пункты

(КДП), оборудованные неполяризующимися электродами сравнения и индикаторами скорости коррозии (рис. 1), а также периодических измерениях защитного потенциала при полевых обследованиях.

Распределение защитного потенциала «труба-земля» по трассе трубопровода носит экспоненциальный характер, при этом максимальная по модулю величина потенциала наблюдается в точке дренажа УКЗ, а минимальная – на конце ее плеч защиты (рис. 2). Характер влияния СКЗ на величину потенциала в конкретной точке трубопровода отражает коэффициент влияния, определяемый по следующей формуле:

$$A_{ij} = \frac{\Delta\phi_i}{\Delta I_j}, \quad (1)$$

где $\Delta\phi_i$ – изменение потенциала в i -й точке контроля, В;

ΔI_j – изменение силы тока j -СКЗ, А.

С учетом формулы (1) величина защитного потенциала «труба-земля» в конкретной точке контроля определится выражением [3]:

$$U_i = \phi_{ict} + A_{i1}I_1 + A_{i2}I_2 + \dots + A_{ij}I_j + \dots + A_{in}I_n \quad (2)$$

где ϕ_{ict} – потенциал сторонних источников тока в i -ой точке трубопровода, В;

A_{ij} – коэффициент влияния j -ой СКЗ на i -ую точку контроля;

I_j – сила тока на выходе j -ой СКЗ, А;

n – количество СКЗ, участвующих в расчете.

Уравнение (2) может быть использовано для записи системы уравнений для всех точек контроля потенциала. В этом случае появляется возможность в режиме реального времени спрогнозировать изменение величины разности потенциалов в любой точке трубопровода в зависимости от выбранной величины силы тока СКЗ, выявить зоны недозащиты, а, следовательно, определить работоспособность системы ЭХЗ. При этом под отказом понимается такое состояние системы ЭХЗ, когда защищенность трубопровода по величине защитного потенциала «труба-земля» не обеспечена в любой из контрольных точек трубопровода.

Основной причиной отказа системы ЭХЗ является отказ одного из следующих ее элементов [3], [4]:

- источника электроснабжения;
- СКЗ;
- кабельной и/или воздушной линии;
- АЗ;
- контактного устройства.

Для вновь построенных трубопроводов отказ одного из выше перечисленных элементов УКЗ однозначно не приводит к отказу системы ввиду того, что защита трубопровода осуществляется несколькими установками, которые, в ряде случаев, могут скомпенсировать падение защитного потенциала на участке отказавшей УКЗ [3], [4]. Схема надежности такой системы ЭХЗ приведена на рис. 3.

Для трубопроводов малой протяженности, защита которых обеспечивается одной УКЗ, и для трубопроводов, находящихся в эксплуатации длительное время, схема надежности систем ЭХЗ имеет вид, представленный на рис. 4. Во втором случае такая схема обуславливается отсутствием зон взаимовлияния соседних УКЗ в результате необратимого старения изоляционного покрытия и частичного разрушения АЗ, что приводит к снижению длины защитной зоны [3], [4]:

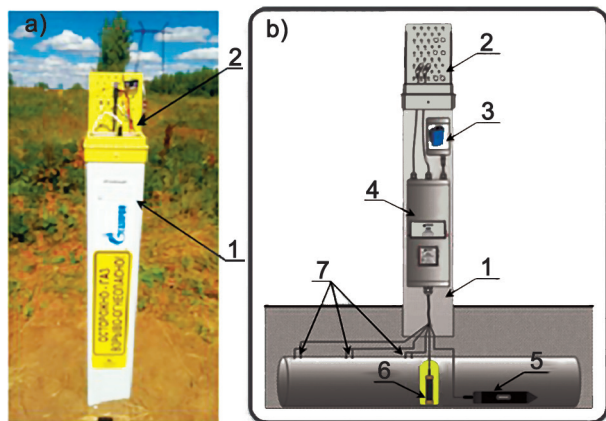


Рис. 1. Контрольно-диагностический пункт СДКМ: а – внешний вид; б – устройство:
1 – стойка КИП; 2 – клеммная панель;
3 – источник питания; 4 – оборудование;
5 – устройство контроля скорости коррозии;
6 – электрод сравнения; 7 – точки подключения к трубопроводу

Fig. 1. Control and diagnostic point SDCM:
a – appearance; b – device: 1 – instrumentation CMP; 2 – terminal board; 3 – power supply;
4 – equipment; 5 – corrosion rate control device; 6 – reference electrode; 7 – points of connection to the pipeline

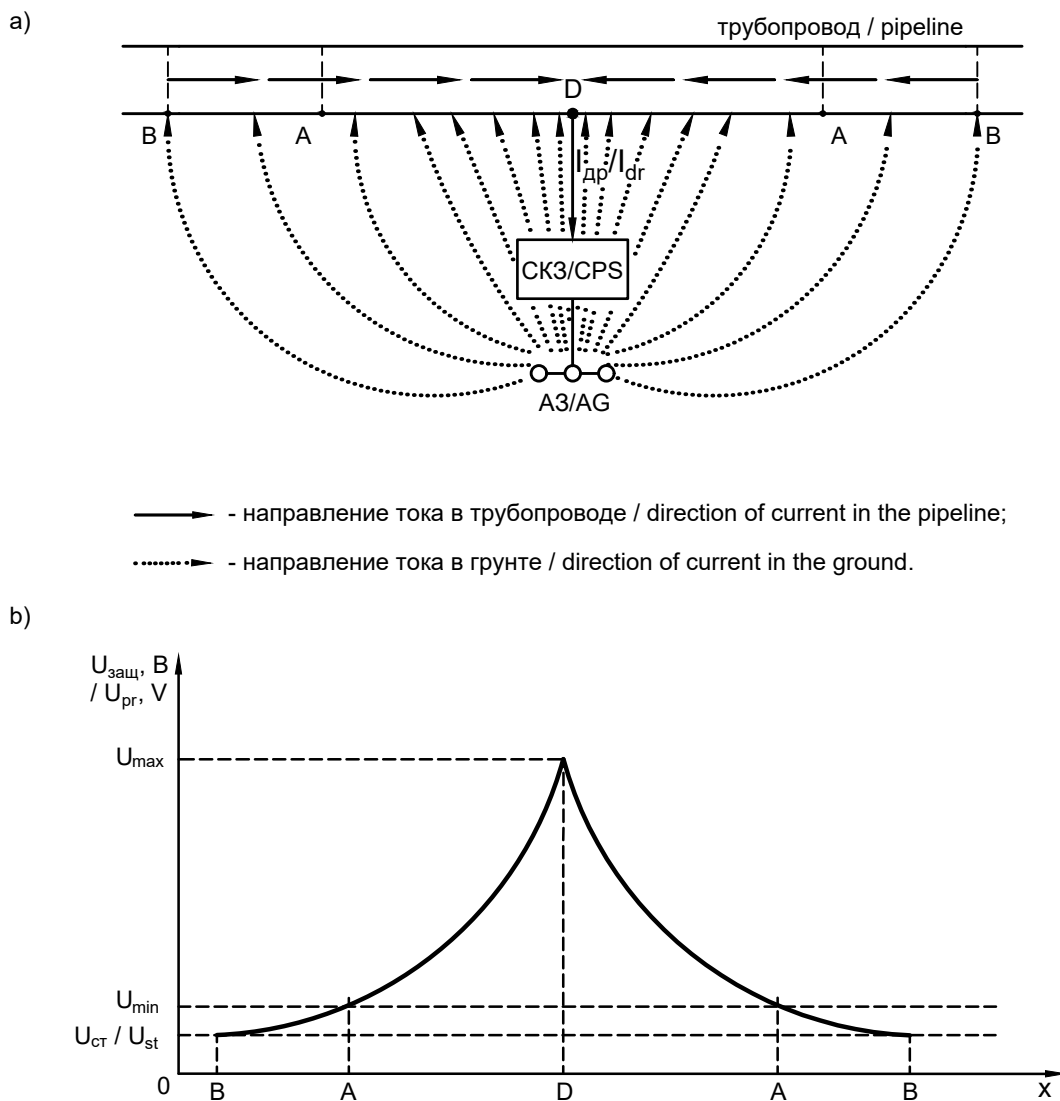


Рис. 2. График распределения защитной разности потенциалов «труба-земля» по трубопроводу: D – точка дренажа; А-А – участок трубопровода, находящийся под защитой; В-А, А-В – участки трубопровода, где не соблюдаются требования НД по защищенности

Fig. 2. Graph of the distribution of the protective potential difference «pipe-to-ground» along the pipeline: D – drainage point; A-A – section of the pipeline under protection; B-A, A-B – sections of the pipeline where the ND requirements for security are not met

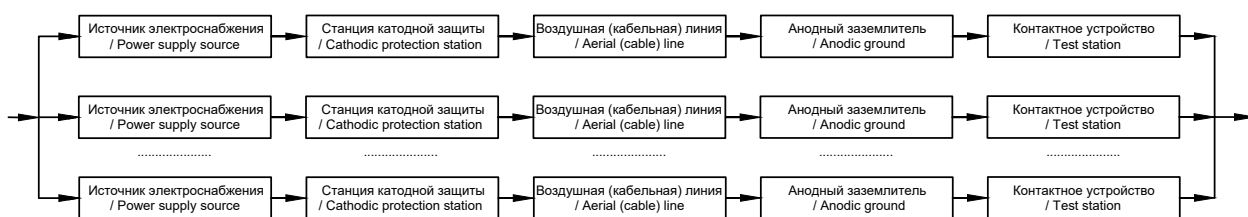


Рис. 3. Структурная схема надежности системы ЭХЗ на новых протяженных трубопроводах

Fig. 3. Structural diagram of the reliability of the ECP system on new extended pipelines

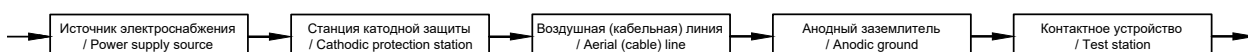


Рис. 4. Структурная схема надежности системы ЭХЗ на длительно эксплуатируемых трубопроводах и трубопроводах малой протяженности

Fig. 4. Structural diagram of the reliability of the ECP system on long-term operated pipelines and pipelines of short length

Также следует отметить, что система ЭХЗ является восстанавливаемой, т.е. восстановление отказавшего элемента возвращает систему в состояние работоспособности. Таким образом, процесс функционирования ЭХЗ представляет собой последовательность чередующихся интервалов работы θ_n и простоя ξ_n (рис. 5) [4].

В качестве примера, для выполнения дальнейших расчетов был выбран участок действующего магистрального газопровода протяженностью 12 км, на котором установлено пять УКЗ и СДКМ. Схема расположения УКЗ представлена на рис. 6.

Чтобы определить состояния системы ЭХЗ, при которых будет наблюдаться ее отказ, необходимо вычислить значения коэффициентов влияния СКЗ на каждую точку контроля защитного потенциала. Для этого, с учетом формулы (2), записывается следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} 0,4 \text{ км: } & \begin{cases} U_1 = \phi_{1ct} + A_{11}I_1 + A_{12}I_2 + A_{13}I_3 + A_{14}I_4 + A_{15}I_5 \end{cases} \\ 3,5 \text{ км: } & \begin{cases} U_2 = \phi_{2ct} + A_{21}I_1 + A_{22}I_2 + A_{23}I_3 + A_{24}I_4 + A_{25}I_5 \end{cases} \\ \text{ГРС: } & \begin{cases} U_3 = \phi_{3ct} + A_{31}I_1 + A_{32}I_2 + A_{33}I_3 + A_{34}I_4 + A_{35}I_5 \end{cases} \\ 6,8 \text{ км: } & \begin{cases} U_4 = \phi_{4ct} + A_{41}I_1 + A_{42}I_2 + A_{43}I_3 + A_{44}I_4 + A_{45}I_5 \end{cases} \\ 10,5 \text{ км: } & \begin{cases} U_5 = \phi_{5ct} + A_{51}I_1 + A_{52}I_2 + A_{53}I_3 + A_{54}I_4 + A_{55}I_5 \end{cases} \\ 11,9 \text{ км: } & \begin{cases} U_6 = \phi_{6ct} + A_{61}I_1 + A_{62}I_2 + A_{63}I_3 + A_{64}I_4 + A_{65}I_5 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

На основании данных изменения режимов работы СКЗ и соответствующих им изменениям значений защитных потенциалов «труба-земля» в точках контроля, используя метод наименьших квадратов, выполняется расчет коэффициентов влияния (табл. 1).

Рассматривая всевозможные варианты состояния системы ЭХЗ при различной конфигурации отказа ее элементов и используя полученные значения коэффициентов влияния СКЗ на величину защитного потенциала в точках контроля, определяется общее состояние системы (рис. 7): работает или отказ. На рис. 8 представлены иллюстрация трех конфигураций системы: а) конфигурация 1; б) конфигурация 10; в) конфигурация 14.

В теории надежности для описания состояния работоспособности объекта используется коэффициент готовности, отражающий вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени [4, 5]. Данный коэффициент определяется следующим образом:

$$K_r = 1 - \sum_{i=1} P_i, \quad (4)$$

где $\sum P_i$ - сумма всех вероятностей, приводящих к отказу системы.

Для анализа безотказности работы системы и определения ее коэффициента готовности используется Марковский метод с построением схемы надежности (рис. 9).

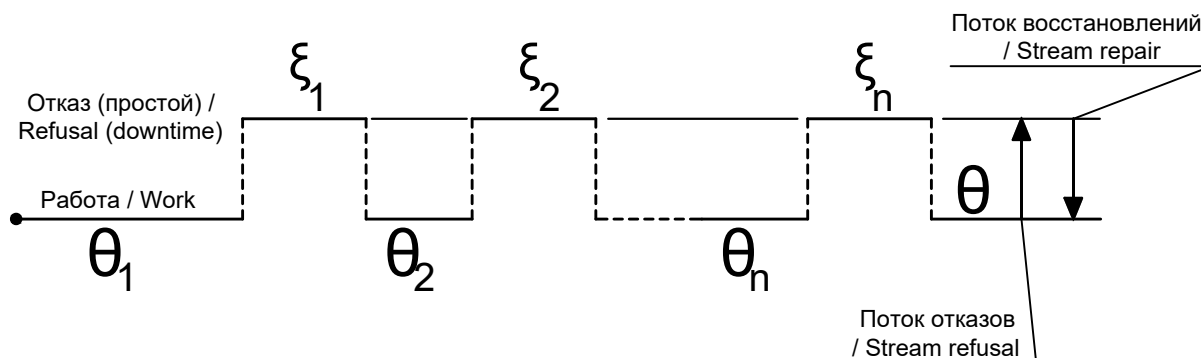


Рис. 5. Схема работы восстанавливаемого объекта

Fig. 5. Scheme of operation of the restored object

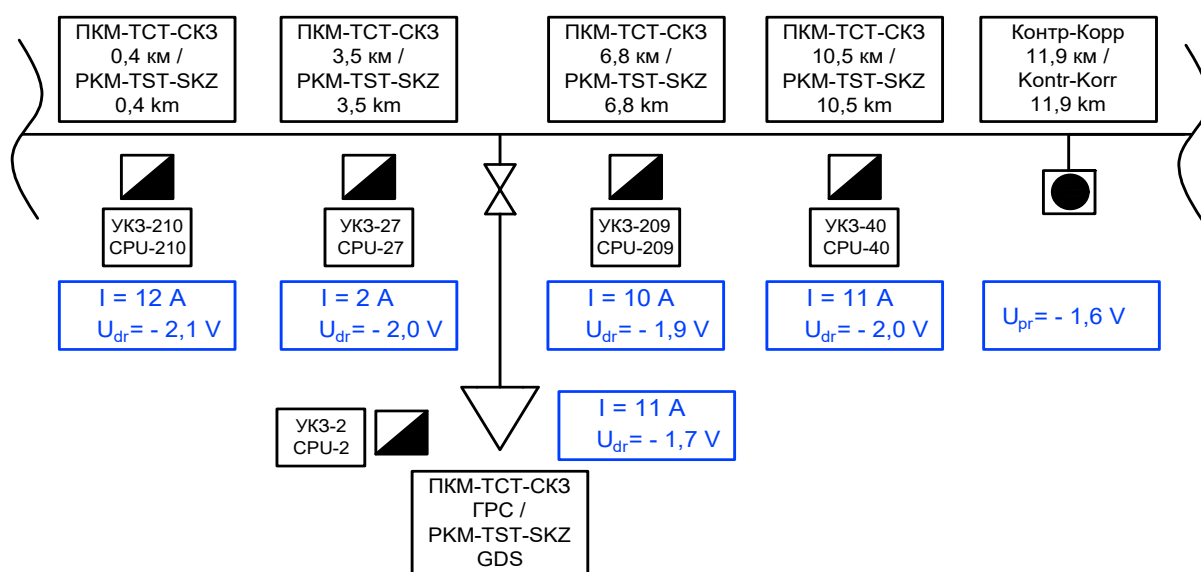


Рис. 6. Схема исследуемого участка газопровода

Fig. 6. Scheme of the studied section of the gas pipeline

При этом полагается, что интенсивности отказа и восстановления являются не зависящими от времени константами [5], [6].

Интенсивность отказов элемента системы может быть определена по следующей формуле (5):

$$\lambda_{eli} = \frac{1}{T_{eli}}, \quad (5)$$

где T_{eli} – наработка элемента ЭХЗ на отказ, ч; а интенсивность восстановления элемента по формуле (6):

$$\mu_{eli} = \frac{1}{\tau_{eli}}, \quad (6)$$

где τ_{eli} – среднее время восстановления элемента ЭХЗ, ч.

На основании паспортных характеристик оборудования системы ЭХЗ, а также статистических данных производителей (наработка на отказ и среднее время восстановления), вычисляются соответствующие интенсивности отказа и восстановления отдельных элементов УКЗ. Выбор величины среднего времени восстановления элемента УКЗ при наличии недозащиты осуществляется из расчета на то, что отказ (перерыв) электрохимической защиты должен быть устранен в течение не более 24 ч.

Интенсивность отказа УКЗ определяется как сумма интенсивностей ее отдельных элементов:

Таблица 1. Результаты расчета коэффициентов влияния

Table 1. Results of calculation of influence coefficients

№	Точки контроля защитного потенциала / Protective potential control points	Сила тока на выходе СКЗ, А / Current strength at the output of the CPS, A					Сторонний потенциал в точке контроля, В / External potential at the control point, V	Защитный потенциал в точке контроля, В / Protective potential at the point control, V
		УКЗ-210 / CPU-210	УКЗ-27 / CPU-27	УКЗ-2 / CPU-2	УКЗ-209 / CPU-209	УКЗ-40 / CPU-40		
		12	2	11	10	11		
		Коэффициенты влияния СКЗ / Influence coefficients of CPS						
1	0,4 км	-0,087	-0,012	-0,002	-0,003	0	-1,073	-2,197
2	3,5 км	-0,021	-0,147	-0,005	-0,018	0	-1,047	-1,827
3	ГРС	0	0	-0,010	-0,103	-0,003	0,031	-1,141
4	6,8 км	0	0	0	-0,007	-0,063	-1,150	-1,913
5	10,5 км	0	0	-0,153	-0,040	0	0,054	-2,029
6	11,9 км	0	0	0	-0,005	-0,022	-1,309	-1,601

№	Конфигурация Configuration	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	УКЗ-210 CPU-210	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-
2	УКЗ-27 CPU-27	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-
3	УКЗ-2 CPU-2	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-
4	УКЗ-209 CPU-209	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-
5	УКЗ-40 CPU-40	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Состояние системы State of the system		P	P	P	O	O	P	P	O	O	P	O	O	P	O	O	O	O	O	P	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

Принятые обозначения / Accepted designations

P	– работает, т.е. защитный потенциал соответствует требованиям НД по всей длине трубопровода / works, that is, the protective potential meets the requirements of ND along the entire length of the pipeline;
O	– отказ, т.е. есть участок, где защитный потенциал не соответствует требованиям НД / failure, that is, there is an area where the protective potential does not meet the requirements of ND;
	– все УКЗ работоспособны / all CPU are operational
	– отказ 2-х УКЗ / refusal of 2 CPU;
	– отказ 4-х УКЗ / refusal of 4 CPU;
+	– УКЗ исправна / CPU is working;
	– отказ 1-й УКЗ / refusal of 1 CPU;
	– отказ 3-х УКЗ / refusal of 3 CPU;
	– отказ всех УКЗ / refusal of all CPU;
-	– отказ УКЗ / refusal CPU.

Рис. 7. Варианты конфигурации системы ЭХЗ

Fig. 7. ECP system configuration options

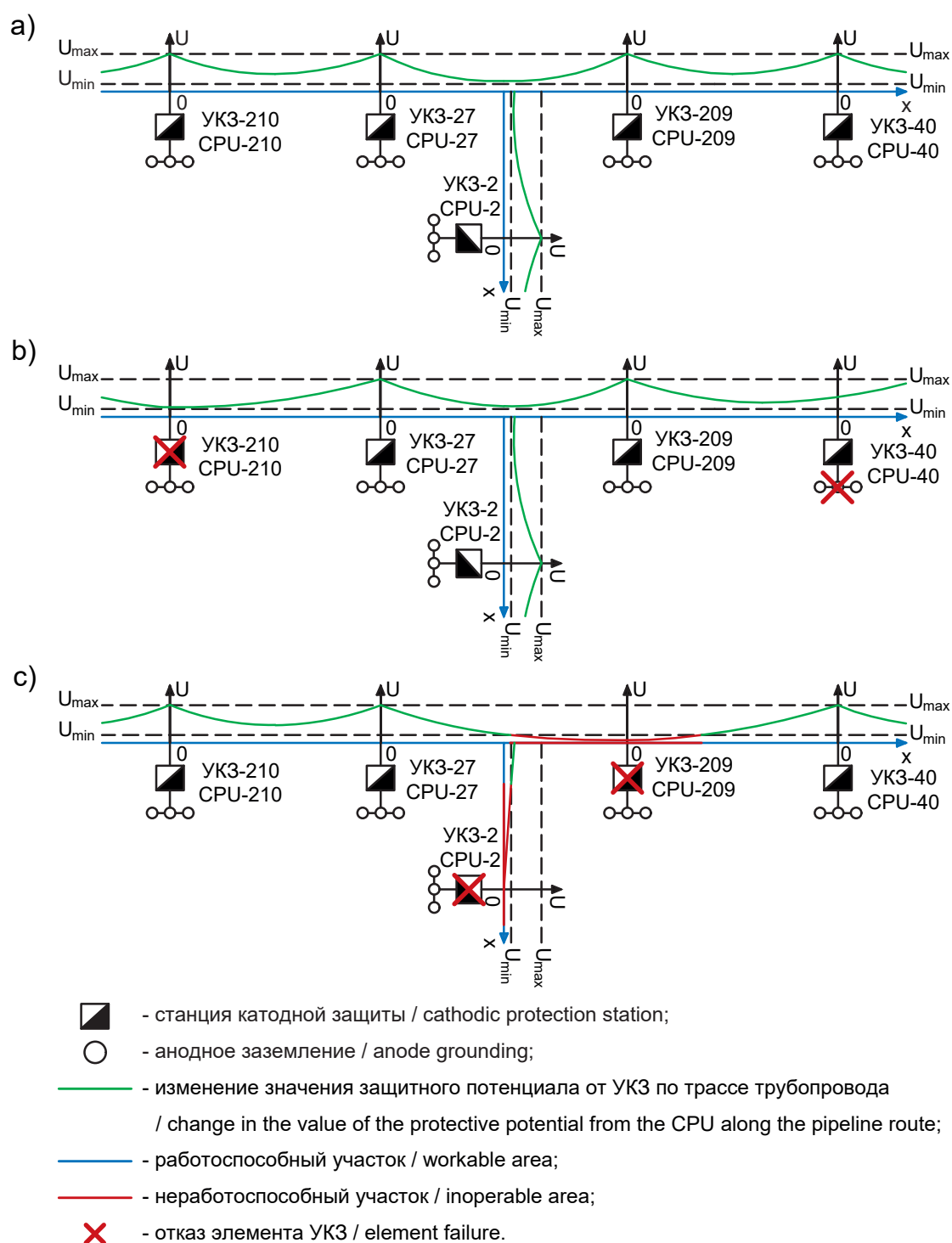
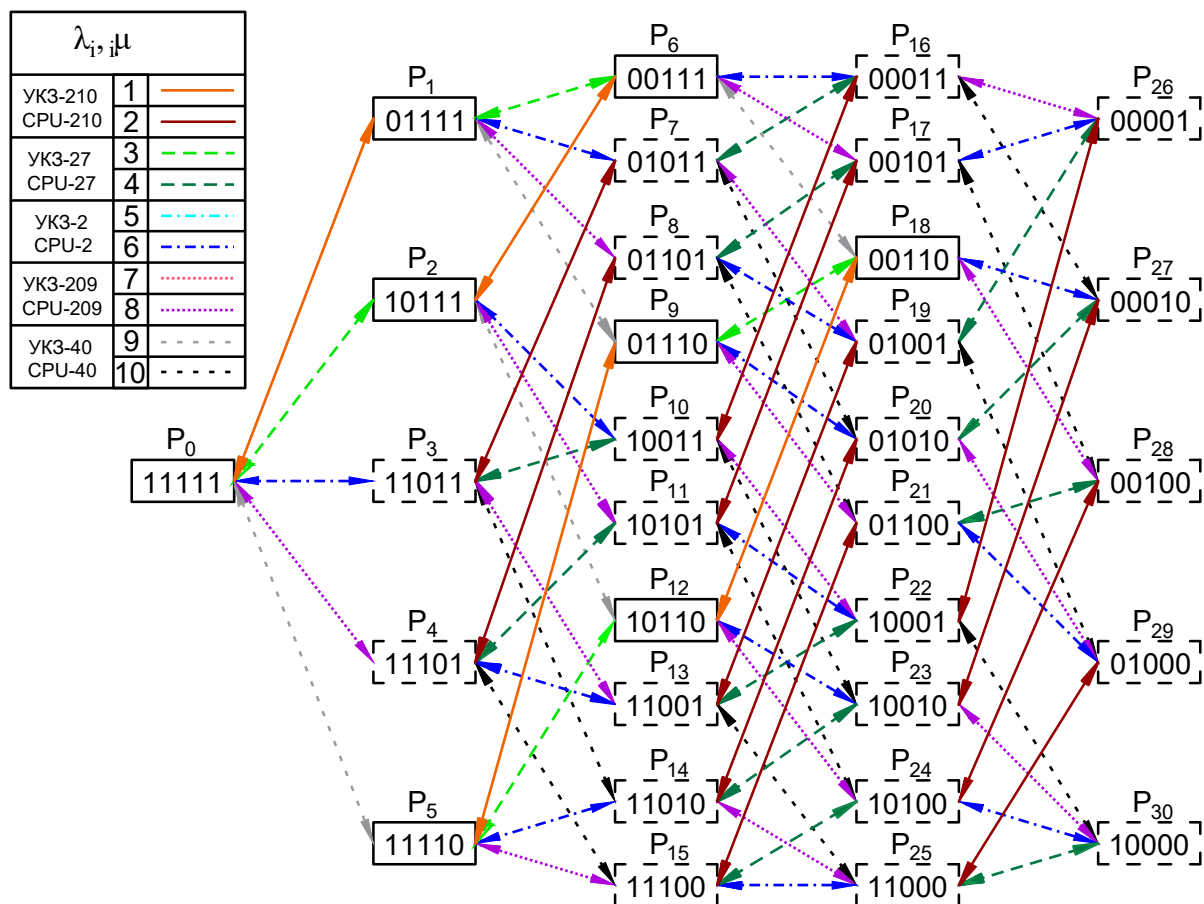


Рис. 8. Варианты схем состояний ЭХЗ участка газопровода:
а) работоспособное состояние системы; б) работоспособное состояние системы при отказе отдельных ее элементов; в) отказ системы

Fig. 8. Variants of the state schemes of the ECP of the gas pipeline section:
а) the health of the system; б) the operable state of the system in case of failure of its individual elements; в) system failure



P_i - вероятность нахождения системы в данной конфигурации / the probability of finding the system in a given configuration.

XXXXX, где 1 – элемент системы работоспособен / system element is operational, 0 – элемент системы отказан / system element denied.

UK3-40 / CPU-40
 UK3-209 / CPU-209
 UK3-2 / CPU-2
 UK3-27 / CPU-27
 UK3-210 / CPU-210

XXXXX система в состоянии работоспособности / system in operational state;

[XXXXX] система в состоянии отказа / system in failure state;

→ направление отказа элемента системы / system element failure direction;

← направление восстановления элемента системы / system element recovery direction.

Рис. 9. Диаграмма состояния системы ЭХЗ участка газопровода
Fig. 9. Diagram of the state of the ECP system of the gas pipeline section

$$\lambda = \sum_{i=1} \lambda_{eli} . \quad (7)$$

Интенсивность восстановления УКЗ при обеспечении защищенности определяется по формуле (8):

$$\mu_1 = \frac{\lambda}{\sum_{i=1} (\lambda_{eli} \tau_{elli})} , \quad (8)$$

а интенсивность восстановления при наличии недозащиты по формуле (9):

$$\mu_2 = \frac{\lambda}{\sum_{i=1} (\lambda_{eli} \tau_{el2i})} . \quad (9)$$

Результаты расчетов интенсивности отказов и восстановления при обеспечении защиты и при недозащите представлены в *табл. 2*.

На основании диаграммы состояния системы ЭХЗ (*рис. 10*) составляются уравнения для расчета величины веро-

ятности состояния системы ЭХЗ. Результаты расчетов приведены в *табл. 3*. Подробная методология решения подобных схем описана в ГОСТ Р МЭК 61165-2019.

Коэффициент готовности для рассматриваемой системы ЭХЗ, в соответствии с формулой (4), равен:

$$K_r = 1 - (P_3 + P_4 + P_7 + P_8 + P_{10} + P_{11} + P_{13} + P_{14} + P_{15} + P_{16} + P_{17} + P_{19} + P_{20} + P_{21} + P_{22} + P_{23} + P_{24} + P_{25} + P_{26} + P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31}) = 0,990846.$$

Полученное значение коэффициента готовности 0,990846 подтверждает то, что на момент исследования выбранная система ЭХЗ находится в рабочем состоянии с вероятностью порядка 99%. При анализе вариантов состояния системы ЭХЗ было определено, что существует семь вариантов конфигураций, при которых соблюдается защищенность трубопровода. Данный факт может быть использован при проведении плановых ремонтных работ. Также было определено, что отказ элементов УКЗ-2 или УКЗ-209 гарантировано приводит к отказу всей системы.

Таблица 2. Результаты расчетов интенсивностей отказа и интенсивностей восстановления для УКЗ

Table 2. Calculation results of failure rates and recovery rates for SC

Наименование УКЗ / Name CPU	Номер возможного значения системы / System possible value number	Интенсивность отказов системы УКЗ λ , ч ⁻¹ / Intensity of failures of the CPU system λ , h ⁻¹	Интенсивность восстановления системы УКЗ μ , ч ⁻¹ / Intensity of recovery of the CPU system μ , h ⁻¹
УКЗ-210 / CPU-210	1	0,000218	0,034671
	2	0,000218	0,053481
УКЗ-27 / CPU-27	3	0,000203	0,034954
	4	0,000203	0,056450
УКЗ-2 / CPU-2	5	0,000188	0,037923
	6	0,000188	0,055357
УКЗ-209 / CPU-209	7	0,000203	0,034954
	8	0,000203	0,056450
УКЗ-40 / CPU-40	9	0,000188	0,038923
	10	0,000188	0,055357

Таблица 3. Результаты расчета вероятностей отказа системы ЭХЗ
Table 3. Results of calculating the probabilities of failure of the ECP system

Вероятное состояние / Probable state	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Значение / Meaning	0,97421	0,0061	0,00564	0,00333	0,00567	0,00488	0,00481	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Вероятное состояние / Probable state	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21
Значение / Meaning	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$	$8,9 \cdot 10^{-8}$
Вероятное состояние / Probable state	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	
Значение / Meaning	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$6,4 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$4,3 \cdot 10^{-10}$	$5,2 \cdot 10^{-10}$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	

Остаточный ресурс системы ЭХЗ

В теории надежности остаточный ресурс – это суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния, т.е. состояния, в котором дальнейшая эксплуатация объекта недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Необратимая деградация параметров ЭХЗ приводит к невозможности поддержания защитного потенциала на прежнем уровне без изменения выходных тока и напряжения СКЗ. Так как эксплуатируемые СКЗ имеют ограничения по запасу мощности, то и изменение выходных параметров станций может быть осуществлено только до определенного предельного значения. Следовательно, в качестве критериев оценки фактического остаточного ресурса системы ЭХЗ могут быть использованы изменения значений силы тока и напряжение на выходе СКЗ

во времени.

Прогнозные значения силы тока и напряжения СКЗ рассчитываются на основании данных о годовом изменении коэффициентов влияния и нагрузки на каждой СКЗ [7]. Указанные параметры в свою очередь определяются на основании экспериментальных данных изменений защитного потенциала, силы тока и напряжения на выходе СКЗ:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta \varphi_{zachi}}{\Delta I_{outi}}}{n}, \quad (10)$$

где $\bar{A}$ – среднее значение коэффициента влияния за рассматриваемый период;
 n – число измерений за рассматриваемый период;

$\Delta \varphi_{zachi}$ – изменение защитного потенциала, соответствующее изменению тока на выходе СКЗ;

ΔI_{outi} – изменение сила тока на выходе СКЗ;

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{U_{outi}}{I_{outi}}}{n}, \quad (11)$$

где $\bar{R}$ – среднее значение нагрузки на СКЗ, Ом;
 U_{outi} – напряжение на выходе СКЗ, В;
 I_{outi} – сила тока на выходе СКЗ, А.

Таблица 4. Исходные данные УКЗ-27 для расчета ресурса системы
Table 4. Original data CPU-27 to calculate the resource of the system

Дата и время / Date and time	Выходное напряжение на выходе СКЗ $U_{вых}$, В / Output voltage CPS U_{out} , V	Сила тока на выходе СКЗ $I_{вых}$, В / Output current CPS I_{out} , V	Суммарный потенциал в точке дренажа $U_{сумм}$, В / Total potential at the drainage point U_{tot} , V
06.06.2017 16:00	28,22208	4,220148	-1,991755
06.06.2017 17:00	28,52097	4,305945	-1,83834
06.06.2017 18:00	28,26279	4,22134	-2,010351
06.06.2017 19:00	29,16161	4,371485	-2,041771
06.04.2018 9:00	32,40869	4,263642	-2,180258

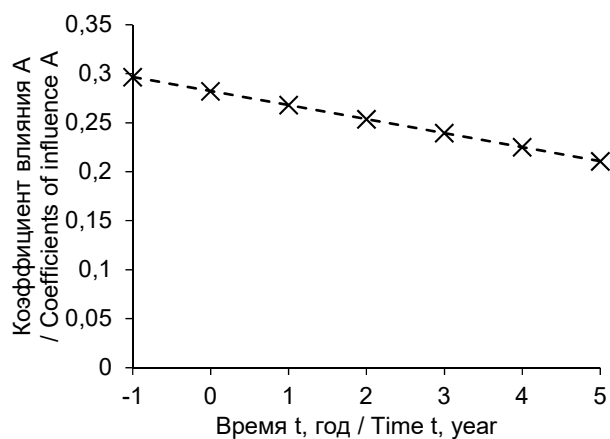


Рис. 10. Прогнозируемые значения коэффициентов влияния СКЗ

Fig. 10. Predicted values of the coefficients of influence of the CPS

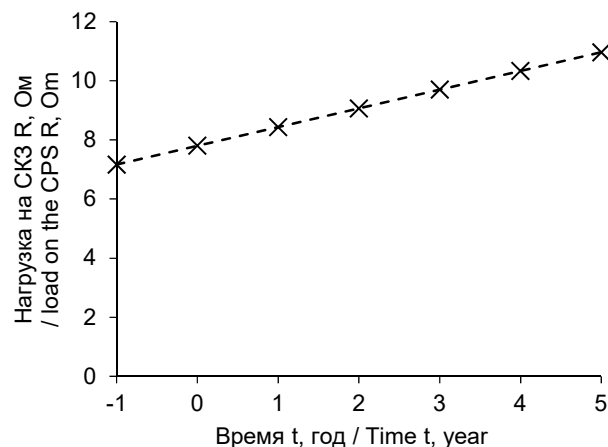


Рис. 11. Прогнозируемые значения нагрузки на СКЗ

Fig. 11. Predicted value of the load on the CPS

Вычисленные средние значения нагрузки и коэффициентов влияния экстраполируются на срок 5 лет. Изменение нагрузки СКЗ характеризует изменение сопротивления растекания анодного заземления, а коэффициенты влияния – изменение состояния изоляционного покрытия [7].

Рассмотрим расчет для УКЗ-27. На основании данных, представленных в табл. 4, выполнен расчет средних значений коэффициента влияния СКЗ и нагрузки на СКЗ, и проведена экстраполяция полученных значений (рис. 10 и 11). Ресурс всей системы определяется по наименьшему из полученных значений.

По результатам экстраполяции данных производится расчет силы тока и напряжения на выходе СКЗ для аналогичного периода исследования. Критерием ограничения построения прогноза будут 70% от номинальных значений характеристик СКЗ (рис. 12 и 13) [8].

Определение оптимального ресурса работы системы с учетом алгоритмов регулирования работы системы ЭХЗ

Существующие алгоритмы оптимального регулирования режимов работы систем ЭХЗ направлены, главным образом, на снижение потребления электроэнергии за счет поиска наиболее оптимальных выходных параметров СКЗ с учетом требований НД по величине защитного потенциала. Однако при реализации алгоритмов регулирования не учитываются техническое состояние объектов, текущий ресурс системы и другие параметры надежности.

Авторами предлагается объединить алгоритмы регулирования режимов работы СКЗ с методами определения параметров надежности и ресурса системы для расчета наиболее оптимального режима работы как по энергопотреблению, так и по продолжительности безотказной работы. Для этого был разработан алгоритм поиска оптимального режима работы СКЗ с учетом максимального времени безотказной работы системы (рис. 14, 15 и 16).

Предлагаемый алгоритм реализуется для линейной части объектов транспорта нефти и газа. По полученным исходным данным ($I_{СКЗ}$, $U_{СКЗ}$, $P_{СКЗ}$, $U_{оп}$, ϕ) с СДКМ производится:

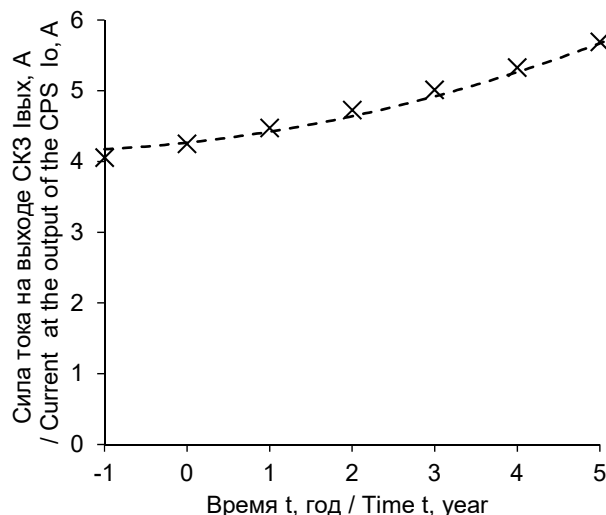


Рис. 12. Прогнозируемые значения силы тока на выходе СКЗ

Fig. 12. Predicted current values at the CPS output

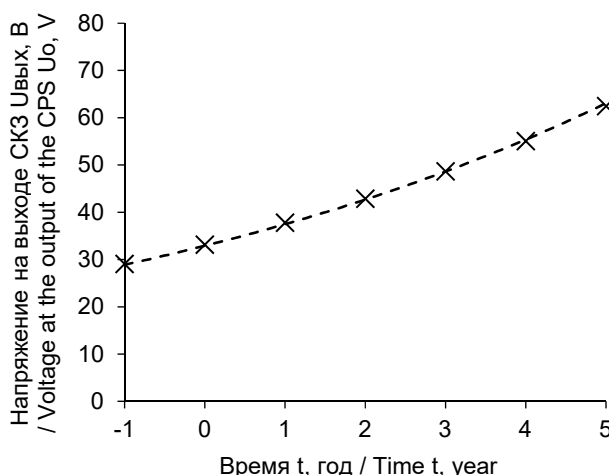


Рис. 13. Прогнозируемые значения напряжения на выходе СКЗ

Fig. 13. Predicted voltage values at the CPS output

- расчет влияния смежных СКЗ на значение защитного потенциала;
- анализ вариативности состояний системы на предмет отказа системы;
- создание Марковской модели надежности для определения величин вероятностей состояний системы с последующим определением коэффициента готовности;
- определение остаточного ресурса системы ЭХЗ;

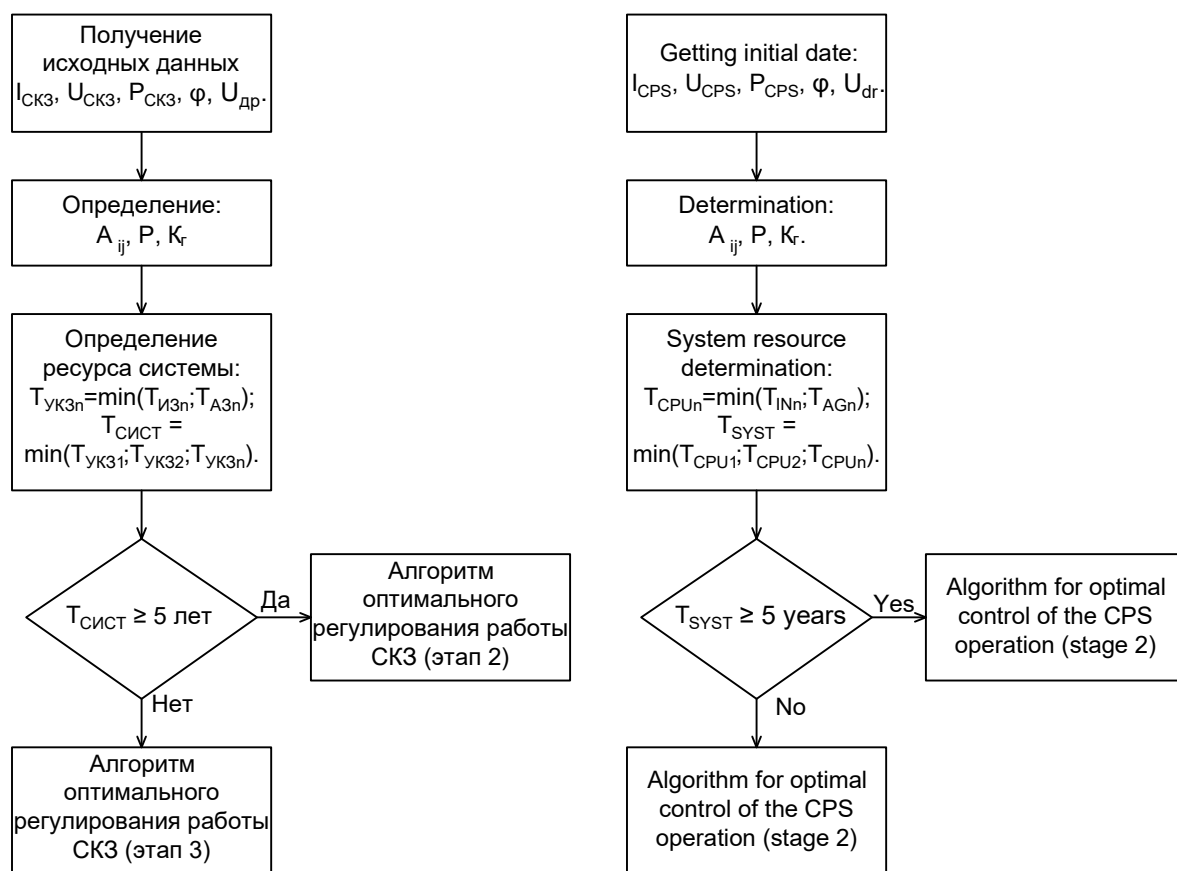


Рис. 14. Алгоритм оптимального регулирования работы СКЗ (этап 1)

Fig. 14. Algorithm for optimal control of the CPS operation (stage 1)

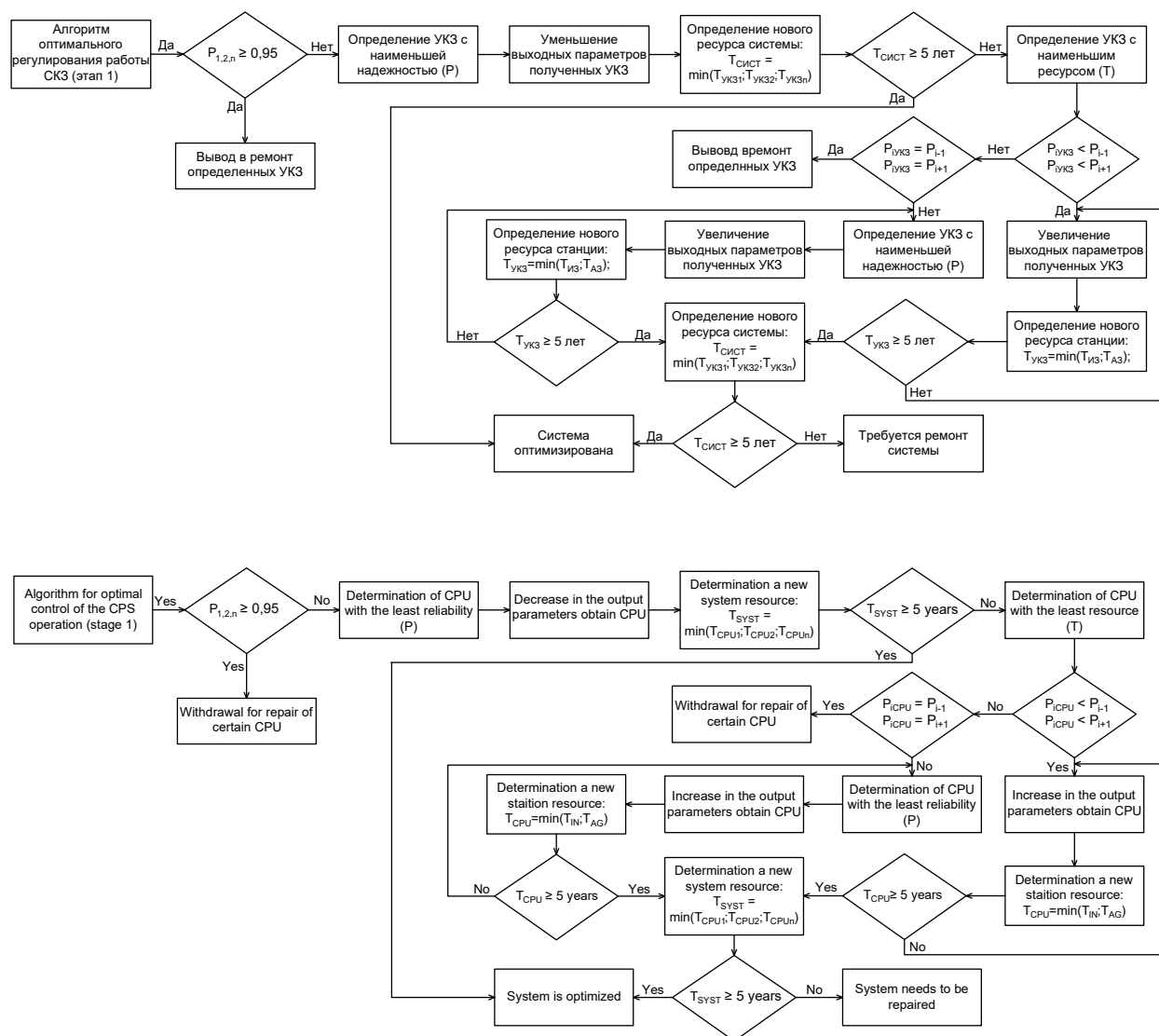


Рис. 15. Алгоритм оптимального регулирования СКЗ (этап 2)
Fig. 15. Algorithm for optimal control of the CPS operation (stage 2)

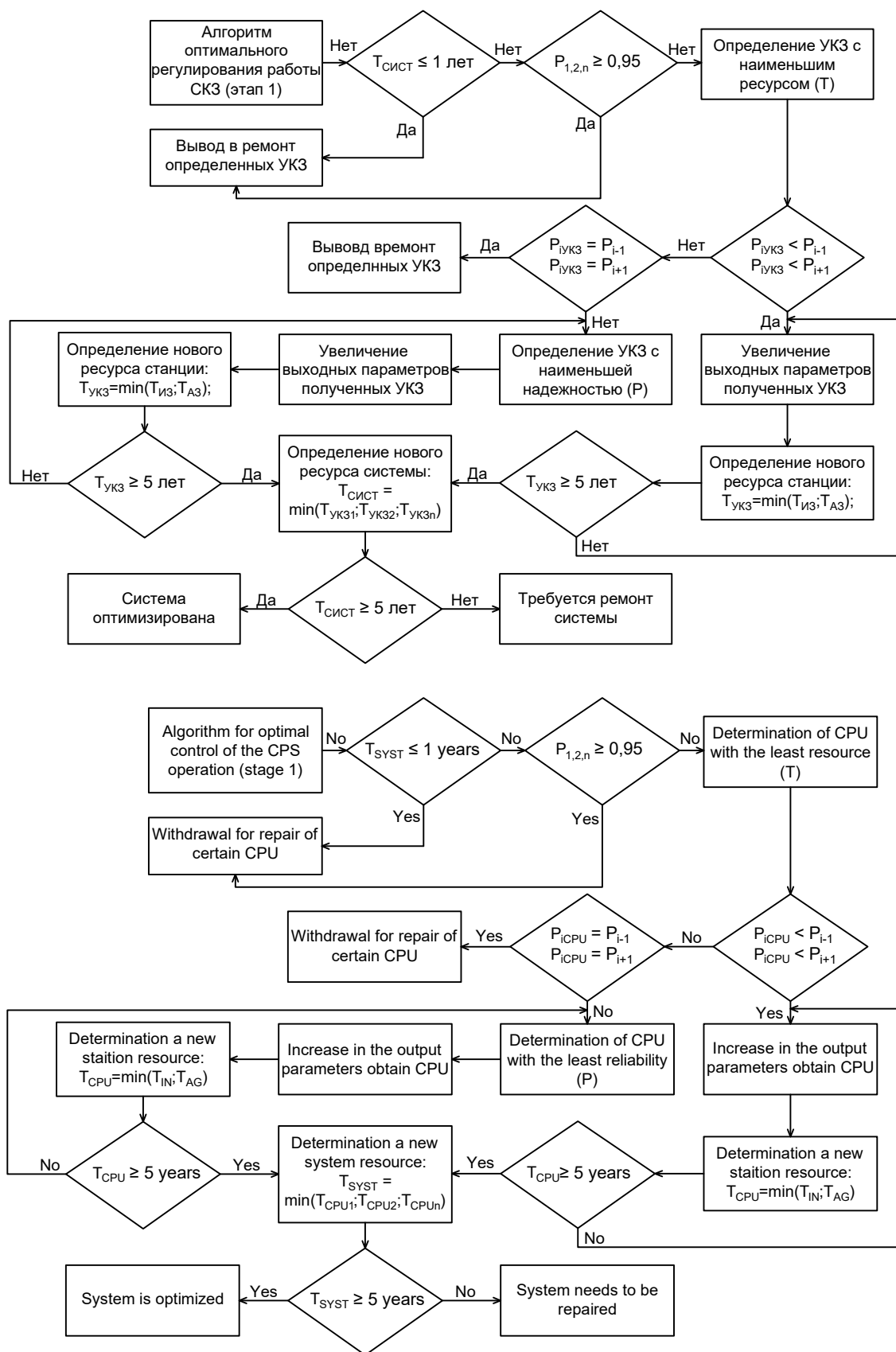


Рис. 16. Алгоритм оптимального регулирования работы СКЗ (этап 3)

Fig. 16. Algorithm for optimal control of the CPS operation (stage 3)

- если ресурс системы равен или больше 5 лет (средний межремонтный срок работы УКЗ), то оптимизация проводится на СКЗ с наименьшей надежностью;
- если ресурс системы менее 5 лет, то оптимизация проводится на СКЗ с наибольшей надежностью;
- для СКЗ с ресурсом в 1 год и менее и с вероятностью отказа более 0,95 требуется ремонт.

Заключение

Предложенный алгоритм определения оптимальных параметров системы электрохимической защиты, с учетом показателей надежности и ресурса ее элементов, в совокупности могут повысить эффективность ее работы. Определение показателей остаточного ресурса каждого элемента системы ЭХЗ, времени ее безотказной эксплуатации приведет к снижению аварийности системы за счет своевременного планирования ремонта ее элементов.

Апробация предложенного алгоритма на действующем участке магистрального газопровода показала его практическую применимость. Алгоритмы могут быть реализованы на базе программного обеспечения оборудования систем дистанционного коррозионного мониторинга.

Список литературы

1. СТО Газпром 9.2-003-2020 Защита от коррозии. Проектирование электрохимической защиты подземных сооружений; Введ: 15.03.2020. – М.: ОАО «Газпром» - ООО «ВНИИГАЗ», 2020. – 23 с.
2. ГОСТ 27-002-2015. Надежность в технике. Термины и определения; Введ. 01.03.2017.
3. Никулин С.А. Повышение эффективности предотвращения коррозии нефтегазопроводов на основе оптимального регулирования режимов работы станции катодной защиты: дис....канд.тех.наук. – Ухта, 2015. – 147 с.
4. ГОСТ Р МЭК 61165-2019. Надежность в технике. Применение Марковских методов; Введ. 01.12.2019.
5. Викторова В.С. Модели и методы расчета надежности технических систем / В.С. Викторова, А.С. Степанянц. – М. : Высш. шк., 2013. – 219 с.
6. Викторова В.С. Динамические деревья

отказов / В.С. Викторова, А.С. Степанянц // Надежность. – 2011, № 3. – С. 20-32.

7. Сабанов С.В., Никулин С.А., Карнавский Е.Л. Определение первоочередности вывода в ремонт оборудования противокоррозионной защиты на участке газопровода в условиях ограниченного финансирования // Практика противокоррозионной защиты. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 7-17. doi: 10.31615/j.corros.prot.2020.96.2-1.

8. Карнавский Е.Л., Никулин С.А. Определение остаточного ресурса оборудования материалов системы ПКЗ [Текст]: Карнавский Е. Л., Никулин С. А // Газовая промышленность. – 2016. – № 737. – С. 14-17.

References

1. Corrosion Protection. Design ingesis of electrochemical protection of underground structures. (2020). *STO Gazprom 9.2-003-2020*. Moscow: VNIIGAZ LLC.
2. Reliability in technology. Terms and definitions. (2015). *GOST 27-002-2015*. St. Petersburg: VNIIGAZ LLC.
3. Nikulin, S. A. (2015). *Improving the efficiency of preventing corrosion of oil and gas pipelines on the basis of optimal regulation of the modes of operation of cathode protection stations*. Ph. D. dissertation. Ukhta.
4. Reliability in technology. Application of Markov methods. (2019). *GOST R MAC 61165-2019*. Moscow: Izdatelstvo Standardinform.
5. Viktorova, V. S. (2013). *Models and methods for calculating the reliability of technical systems* / V.S. Viktorova, A.S. Stepanyants – Moscow: Higher school.
6. Viktorova, V. S. (2011). Dynamic fault trees / V.S. Viktorova, A.S. Stepanyants. *Reliability*, (3), 20-32.
7. Sabanov, S. V., Nikulin, S. A., Karnavsky , E. L. (2020). Determination of the priority of putting the anticorrosion protection equipment into repair at the gas pipeline section in conditions of limited funding. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 25(2), 7-17. doi: 10.31615/j.corros.prot.2020.96.2-1
8. Karnavsky, E. L., Nikulin, S. A. (2016). Definition of the residual resource of the materials of the PPC system: Karnavsky E.L., Nikulin S. A. *Gas industry* (737), 14-17.



Информация об авторах

Васин Денис Александрович, инженер, АО «Гипрогаз-центр», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Шеферов Александр Иванович, инженер, АО «Газпром проектирование», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Никулин Сергей Александрович, к.т.н, доцент, главный специалист, АО «Газпром проектирование», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Карнавский Евгений Львович, начальник ОПС ЭХЗ, АО «Газпром проектирование», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Косарева Любовь Александровна, ведущий инженер, ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Information about authors

Denis A. Vasin, engineer, JSC «Giprogascentr», Nizhniy Novgorod, Russian Federation

Aleksandr I. Sheferov, engineer, JSC «Gazprom project», Nizhniy Novgorod, Russian Federation

Sergey A. Nikulin, Ph.D. in Technical Sciences, associate professor, primary specialist, JSC «Gazprom project», Nizhniy Novgorod, Russian Federation

Evgeny L. Karnavsky, Head of the OPS ECP, JSC Gazprom Proektirovanie, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Lybov' A. Kosareva, Lead Engineer, LLC «Gazprom Transgaz Nizhny Novgorod», Nizhny Novgorod, Russian Federation

www.corrosion-protection.ru

Уважаемые коллеги!

*В ответ на Ваши просьбы мы открываем
бесплатный доступ к архивным выпускам
нашего журнала.*

*Электронные версии публикаций доступны
на официальном сайте журнала.*

Ваша редколлегия

