

Автономные источники тока для средств электрохимической защиты

В.А. Попов (ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»)

В 2011 г. в ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» прошло совещание по вопросам применения автономных источников тока (АИТ) для электроснабжения объектов ОАО «Газпром». Рассматривались вопросы повышения надежности и эффективности электроснабжения линейных потребителей в соответствии с СТО Газпром 2-6.2-149-2007 «Категорийность электроприемников промышленных объектов ОАО «Газпром».

Как альтернатива централизованному электроснабжению участниками совещания предложен положительный опыт эксплуатации автономных источников электрической энергии, а также лабораторные и опытные образцы перспективных изделий (табл. 1).

Таблица 1

Автономные источники тока

Наименование	Электрическая мощность, Вт	Производитель
Автономный источник тока термоэлектрический АИТТ-500Г	500	ООО «Термотехнологии»
Автономный источник тока термоэлектрический АИТТ-750Г	750	ООО «Термотехнологии»
Опытный образец автономного источника тока на твердооксидных элементах	1000	ФГУП РФЯЦ ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина
Лабораторный образец электрохимического генератора ЭХГ-100	100	Институт высокотемпературной электрохимии РАН
Детандер-генераторный агрегат ДГА-0,3	н/д	ОАО «Турбохолод»

Окончание табл. 1

Наименование	Электрическая мощность, Вт	Производитель
Детандер-генераторный агрегат ДГА-10	н/д	ОАО «Турбохолод»
Детандер-генераторный агрегат ДГА-300	н/д	ОАО «Турбохолод»
Турбодетандерная установка ТДУ-1	н/д	ЗАО «НПК НТЛ»
Турбодетандерная установка ТДУ-2	н/д	ЗАО «НПК НТЛ»
Микротурбодетандерный генератор МДГ-20	0–20000	ГОУ «Санкт-Петербургский ГПУ» ООО «НТЦ «Микротурбинные технологии»
Блочно-комплектное устройство электроснабжения (БКЭС) на базе различных источников (микротурбины, твердотопливные элементы, солнечные модули, ветроэнергетические)		ДООАО «Электрогаз»

ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» остро нуждается в автономных источниках тока небольшой мощности (1–5 кВт) для обеспечения электроснабжения средств ЭХЗ на газопроводах, удаленных от существующих распределительных электрических сетей. Существующие сети электроснабжения также не обеспечивают его требуемой надежности. Кроме того, за последние 20 лет практически остановилось строительство новых вдольтрассовых воздушных линий электропередачи. В то же время качество изоляционного покрытия на газопроводах закономерно снижается, поэтому существует необходимость в дополнительных установках катодной защиты (УКЗ).

В настоящее время ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» эксплуатирует следующие типы АИТ (табл. 2).

Таблица 2

АИТ, используемые в ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»

Наименование АИТ	Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм	Масса, кг	Номинальная электрическая мощность, Вт	Выходное напряжение, В	Расход природного газа (метана CH_4), $\text{м}^3/\text{ч}$	Расход природного газа (метана CH_4), $\text{м}^3/\text{кВт}$
АИТ-150	500×500×1000	120	150	30	1,8	12
Global TEG-5220	795×457×1011	83	175	24	0,82	4,7
АИТТ-500Г	2630×2630×3700	2500	500	28,5	3	6
ЭХГ-100	Корпус: диаметр 250, высота 720	20	100	9,5	0,06	—
	Блок управления 410×460×150					
Аккумуляторы	—	—	—	—	0	0

Автономный источник тока АИТ-150

С 2003 г. на газопроводах ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» установлено 57 АИТ-150 (рис. 1), из них эксплуатируется 48 шт., неисправно 9 шт.

Выход из строя автономных источников тока, как показала практика, происходит не одномоментно, за исключением отказов устройств грозозащиты. Обычно наблюдается снижение эффективности по причине деградации термоэлементов, что дает возможность принять меры по обеспечению защищенности газопровода. Применение антивандальных блок-боксов для АИТ-150 полностью исключило возможность хищения. За весь период эксплуатации зафиксирована одна попытка вскрыть блок-бокс третьими лицами.

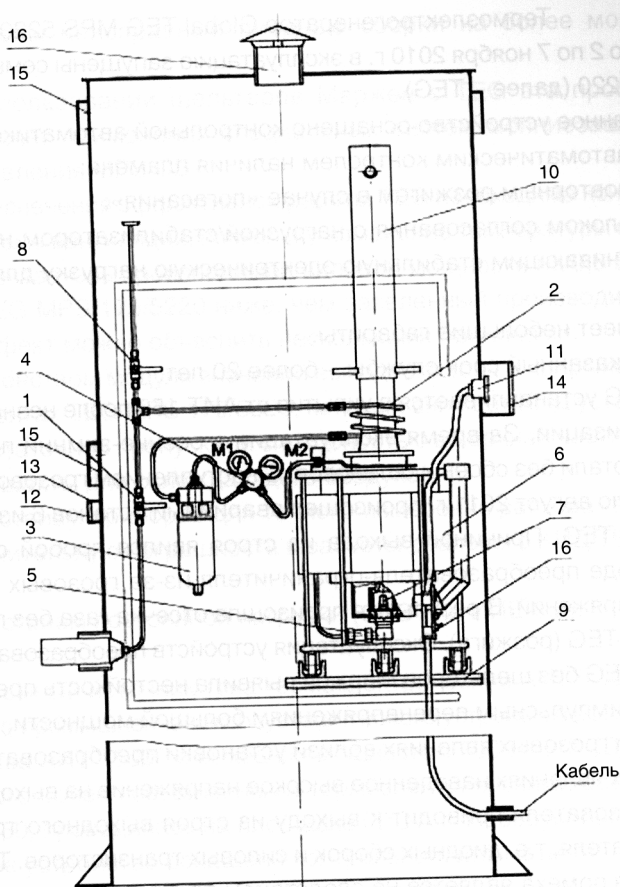


Рис. 1. Общий вид термогенератора АИТ-150: 1 – кран; 2 – подогреватель; 3 – фильтр-сепаратор; 4 – редуктор газовый баллонный; 5 – дроссель; 6 – генератор ГТГ-150Н; 7 – горелка; 8 – кран; 9 – направляющие; 10 – труба; 11 – разъем; 12, 14 – заглушки; 13 – окно; 15 – вентиляционные отверстия (7 шт.); 16 – вытяжная труба

Термоэлектрогенератор Global TEG MPS 5220

Со 2 по 7 ноября 2010 г. в эксплуатацию запущены семь Global TEG MPS 5220 (далее – TEG).

Данное устройство оснащено контрольной автоматикой:

- автоматическим контролем наличия пламени;
- повторным розжигом в случае «погасания»;
- блоком согласования с нагрузкой/стабилизатором напряжения, обеспечивающим стабильную электрическую нагрузку для термоэлементов.

Имеет небольшие габариты.

Доказанный срок службы – более 20 лет.

TEG устанавливается в укрытия от АИТ-150 после незначительной модернизации. За время эксплуатации в осенне-зимний период TEG проработали без сбоев и остановов. С наступлением грозового периода с июня по август 2011 г. произошел аварийный останов 6 из 7 установленных TEG. Причиной выхода из строя явился пробой синисторов на выходе преобразователя-ограничителя из-за грозовых импульсов перенапряжений. В результате произошла отсечка газа без повторного запуска TEG (розжига). Эксплуатация устройств преобразования напряжения TEG без шельтеров Маржен выявила нестойкость преобразователей к импульсным перенапряжениям большой мощности, возникающим при грозовых явлениях вблизи установки преобразователей. При грозовых явлениях наведенное высокое напряжение на выходные цепи преобразователя приводит к выходу из строя выходного тракта преобразователя, т.е. диодных сборок и силовых транзисторов. Так как импульсная помеха является не следствием прямого попадания молнии, а наведенной помехой на длинные кабельные связи, производителем были проведены доработки преобразователя:

- установлены на входных и выходных клеммах быстродействующие газовые разрядники типа B88069-X5010 Bourns на напряжение 90 В с максимальным током разряда 10 кА;
- заменены неисправные транзисторы на более мощные типа IRFP064 с меньшим напряжением падения перехода;

- заменены неисправные диодные сборки на более мощные MBR4045.

При использовании шельтеров Маржен с TEG эта проблема решена за счет применения специальных систем молниезащиты в шкафу управления MPS CB.

Для обеспечения эффективной работы TEG необходима контролируемая система вентиляции, поскольку изменение температуры на 1 °C изменяет показатель производимой валовой мощности на 0,8 Вт.

КПД TEG MPS 175/5220 ниже, чем заявленный производителем. Данный эффект можно объяснить несколькими причинами:

- неравенством модуля значений выходного тока и напряжения на термоэлементах TEG MPS 175/5220, который снижает КПД установки;
- недостаточной пропускной способностью в верхней части вентиляционной шахты для охлаждающего воздуха;
- отсутствием приборов для точного измерения расхода газа, что вносит значительную погрешность в расчеты реального КПД TEG MPS 175/5220;
- отсутствием постоянной нагрузки (СКЗ или ИПЕ-0,2).

Автономный источник тока термоэлектрический АИТТ-500Г

Опытно-промышленная эксплуатация нового устройства российского производства АИТТ-500Г с выходной мощностью 500 Вт и КПД до 3 %, оснащенного более совершенными термоэлектрическими батареями, чем АИТ-150, проводилась на площадке ГРС-1 г. Первоуральска.

Данное устройство оснащено контрольной автоматикой:

- автоматическим контролем наличия пламени;
- повторным розжигом в случае «погасания»;
- блоком согласования с нагрузкой (стабилизатор напряжения), обеспечивающим стабильную электрическую нагрузку для термоэлементов;

Применение инновационного для данного типа устройств способа передачи и утилизации тепла обеспечивает стабильный температурный режим работы термоэлементов.

Электрохимический генератор ЭХГ-100

ЭХГ-100 – это устройство, в котором химическая энергия восстановителя (природного газа) и окислителя (кислорода воздуха), непрерывно подводимых к электродам батареи топливных элементов, преобразуется в электрическую.

Рассматривая мощность АИТ для электроснабжения УКЗ, можно привести пример расчета параметров установки катодной защиты. Мощность УКЗ, полученная в результате расчета, составила 3,47 Вт для защиты участка реального газопровода длиной 71 км, что значительно отличается от фактической технологии ЭХЗ – сегодня нормативный уровень защитного потенциала на этом же участке газопровода обеспечивают 7 установок катодной защиты суммарной мощностью 9,4 кВт.

Поскольку методика не соответствует действительности, приходится ограничиваться коррозионным мониторингом. Составной частью системы коррозионного мониторинга (СКМ) является приведенная ниже методика контроля технического состояния АИТ.

Цель экспериментальных исследований заключалась в определении текущих параметров АИТ-150 и стабильности их технических характеристик во времени (табл. 3).

Таблица 3

Основные технические характеристики АИТ-150

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальное напряжение, В (при $t_{гор} = \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$27,5 \pm 0,5$
Номинальный ток, А (при $t_{гор} = \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$5,45 \pm 0,2$
Номинальная мощность, Вт (при $t_{гор} = \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)	150
Напряжение холостого хода, В, не менее (при $t_{гор} = \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)	48
Сопротивление электрическое внутреннее номинальное, Ом, не более ($R_{вн}$)	5,0
Сопротивление электрической изоляции в номинальном режиме, МОм, не менее ($R_{из}$)	0,1

Контролируют следующие параметры:

- величина выходного тока и напряжения ($I_{\text{ТЭГ}}$, $U_{\text{ТЭГ}}$);
- выходное напряжение АИТ-150 при разомкнутой цепи ($U_{\text{рц}}$);
- температура теплоприемника и радиатора ($t_{\text{т}}$, $t_{\text{р}}$);
- определение внутреннего сопротивления ТЭГ ($R_{\text{вн}}$);
- поляризационный потенциал газопровода в точке дренажа и его стабильность во времени ($\varphi_{\text{бос}}$);
- параметры изолирующих фланцев (ИФ).

Выходной ток АИТ-150 оценивался по падению напряжения на шунте 10А-75мВ, включенном в нагрузочную цепь, с последующим пересчетом по формуле

$$I_{\text{ТЭГ}} = \frac{\Delta U \times 10}{75}, \quad (1)$$

где ΔU – падение напряжения на шунте, измеренное с помощью долговременных регистраторов «Автом-303» или РАД-256.

Выходное напряжение АИТ-150 измерялось и регистрировалось непосредственно на выходных клеммах термогенератора. Данный параметр разомкнутой цепи измерялся при кратковременном размыкании цепи нагрузки. Температура теплоприемника оценивалась по падению напряжения на встроенном термосопротивлении в пересчете по градуировочному графику. Температура радиатора измерялась контактным способом с помощью термодатчика мультиметра 840G. Давление газа определялось по показанию манометра. Внутреннее электрическое сопротивление ТЭГ вычислялось по формуле

$$R_{\text{вн}} = \frac{U_{\text{рц}} - U_{\text{ТЭГ}}}{I_{\text{ТЭГ}}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{рц}}$ – напряжение разомкнутой цепи в номинальном режиме; $U_{\text{ТЭГ}}$ – напряжение ТЭГ в номинальном режиме; $I_{\text{ТЭГ}}$ – ток ТЭГ в номинальном режиме.

Опытным путем было установлено, что вольт-амперная характеристика АИТ при постоянной температуре термогенератора имеет пропорциональную зависимость выходного тока от напряжения, а ее коэффи-

коэффициент угла наклона характеризует внутреннее сопротивление термогенератора. Таким образом, для определения внутреннего сопротивления ТЭГ достаточно иметь всего две точки тока и напряжения при различном сопротивлении и неизменном режиме работы горелки. Так как зависимость тока и напряжения линейная, она будет получена следующим образом:

$$R_{\text{вн}} = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2}, \quad (3)$$

где U_1 и U_2 – напряжение ТЭГ; I_1 и I_2 – ток ТЭГ при сопротивлении нагрузки 1 и 2 соответственно.

Эффективность работы АИТ определялась при рассмотрении зависимостей выходной мощности термогенератора от разности температур его горячего и холодного спаев и суммарной нагрузки на ТЭГ. Рассмотрение полученных характеристик позволяет определить, насколько эффективно подобран температурный режим горелки и способен ли АИТ при существующей нагрузке выдавать и поддерживать заданные выходные характеристики.

Экспериментальные исследования АИТ-150 проводились на газопроводах-отводах, расположенных в зоне действия блуждающих токов от электрифицированных железных дорог в Малоистокском и Невьянском ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» (рис. 2).

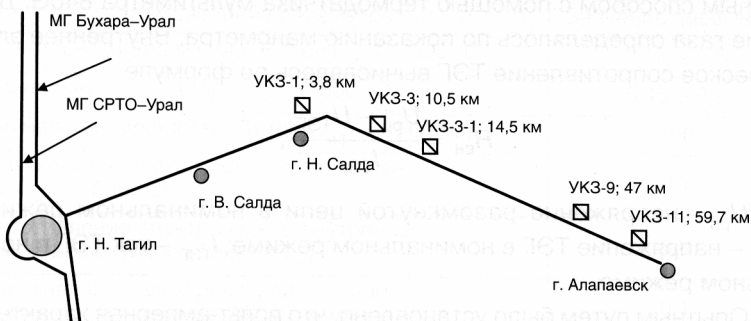


Рис. 2. Схема расположения УКЗ, оборудованных АИТ, на газопроводе-отводе к г. Алапаевску

Так как газопровод-отвод к г. Режу находится в зоне действия блуждающих токов, оценка его защищенности проводилась с учетом минимальных и максимальных зафиксированных потенциалов (табл. 4).

Таблица 4

Параметры ЭХЗ газопровода-отвода к г. Режу (м.с.э.)

Место проведения измерений	Значения суммарного потенциала труба–земля по м.с.э., В			Разброс потенциала, В	Защищенность по времени, %
	минимальное	максимальное	среднее		
3	–0,90	–6,60	–2,94	5,70	100,0
3А	–0,70	–6,44	–3,10	5,74	99,8
4	–1,26	–4,24	–2,89	2,98	100,0
5	–0,57	–3,14	–1,71	2,57	99,7
6	–1,02	–6,12	–3,76	5,10	100,0

Из представленных данных следует, что наибольшее отклонение потенциалов происходит в сторону избыточной защиты, что может быть обусловлено омической составляющей. С использованием технической возможности подключения на обследуемых УКЗ-3, УКЗ-6 и между УКЗ-5 и УКЗ-6 проведены измерения по зонд-модульной (ЗМ) технологии. Результаты измерения поляризационного потенциала без омической составляющей с помощью ЗМ и потенциала с омической составляющей относительно стационарного электрода ЭНЕС приведены в табл. 5.

Блуждающий ток оказывает влияние не только на состояние защищенности газопровода, но и вносит изменения в режим работы термогенератора.

Наиболее характерным примером является работа УКЗ-3, где блуждающий ток в цепи труба–анод и балластного резистора в течение нескольких секунд меняет свое направление на противоположное в сравнении с выходным током АИТ-150 (рис. 3).

В летнее время эти токи могут вырасти многократно, что отрицательно скажется на работоспособности АИТ. Для исключения встреч-

Таблица 5

Параметры ЭХЗ газопровода-отвода к г. Режу (ЗМ и ЭНЕС)

Место проведения измерений	Поляризационный потенциал, измеренный с помощью ЗМ, В	Суммарный потенциал, измеренный с помощью ЭНЕС, В	Ток, протекающий через вспомогательный образец, мА	
			ЗМ	ЭНЕС
УКЗ-3	-1,01	-2,94	-0,56 (катодный)	-2,14 (катодный)
УКЗ-3А	—	-3,10	—	0,0
УКЗ-4	—	-2,89	—	0,0
УКЗ-5	—	-1,71	—	0,0
УКЗ-6	—	-3,76	-0,25 (катодный)	-0,27 (катодный)
КИП-36 (между УКЗ-5 и УКЗ-6)	-0,94	—	-0,27 (катодный)	—

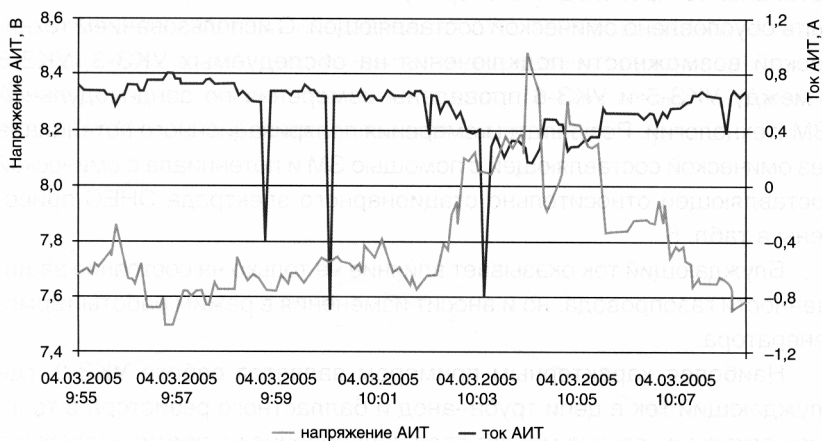


Рис. 3. Режимы работы УКЗ-3

ного блуждающего тока было рекомендовано использовать на АИТ автоматические катодные станции типа ИПЕ-0,2 либо включение в анодную цепь диода (например, В 50-3-0,5 У2).

Учитывая, что техническое состояние термогенератора необходимо оценивать при номинальном режиме работы ($U_{ТЭГ} = 27,5 \pm 0,5$ В; $I_{ТЭГ} = 5,45 \pm 0,2$ А; $R_{нагр} = 5,0$ Ом; $T_{гор} = 490 + t_{окр}$, °С), а эксплуатация АИТ ведется при более низких рабочих характеристиках, необходимо разработать способы оценки технического состояния АИТ в текущем режиме эксплуатации.

Для решения данной задачи были получены вольт-амперные характеристики АИТ и зависимости выходной мощности термогенератора от разности температур горячего и холодного спаев и суммарного сопротивления внутренней и внешней цепей. Данные характеристики позволяют сделать вывод о соответствии АИТ номинальным техническим данным и, соответственно, об эффективности его использования.

Снятие вольт-амперной характеристики проводилось по каждому из АИТ в отдельности по трем точкам: при нагрузке 5,0 Ом; под нагрузкой цепи труба–анод и на «холостом ходу», не изменяя температуры термогенератора (рис. 4). Также была построена вольт-амперная характеристика на основе паспортных данных.

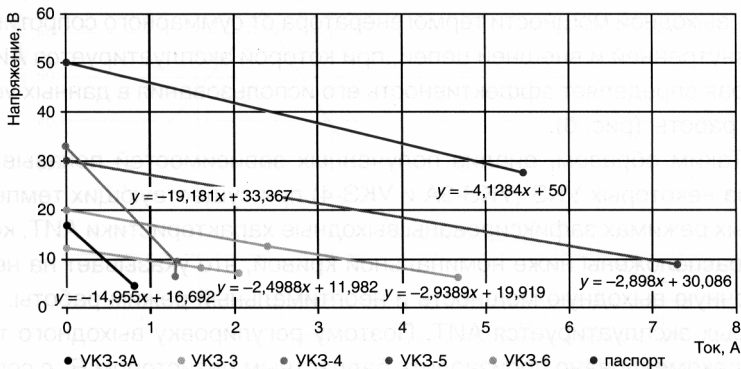


Рис. 4. Вольтамперная характеристика АИТ при различных температурных режимах горячего и холодного спаев

Режим работы АИТ определяется сопротивлением нагрузки, внутренним сопротивлением термогенератора и разницей температур между горячим и холодным спаями. На основе полученных данных построены линейные уравнения вида

$$U_{\text{ТЭГ}} = -k \cdot I_{\text{ТЭГ}} + U_{\text{рц}}, \quad (4)$$

где $U_{\text{ТЭГ}}$ – выходное напряжение ТЭГ; $I_{\text{ТЭГ}}$ – выходной ток ТЭГ; $U_{\text{рц}}$ – напряжение разомкнутой цепи или холостого хода.

Таким образом, коэффициент угла наклона линейного уравнения вольт-амперной характеристики АИТ при различной нагрузке и неизменной разнице температур горячего и холодного спаев характеризует внутреннее сопротивление термогенератора, которое согласно техническим требованиям не должно превышать 5 Ом.

С учетом полученных зависимостей, приведенных на рис. 4, установлено, что внутреннее сопротивление обследуемых АИТ составляет: УКЗ-3 – 2,5 Ом; УКЗ-3А – 15,0 Ом; УКЗ-4 – 19,2 Ом; УКЗ-5 – 2,9 Ом; УКЗ-6 – 2,9 Ом.

Для определения КПД использования термогенераторов получены зависимости:

- выходной мощности АИТ от разности температур горячего и холодного спаев (рис. 5);
- выходной мощности термогенератора от суммарного сопротивления внутренней и внешней цепей, при которой эксплуатируется АИТ и которая определяет эффективность его использования в данных условиях работы (рис. 6).

Таким образом, анализ полученных зависимостей показывает, что на некоторых УКЗ (УКЗ-3А и УКЗ-4) при существующих температурных режимах зафиксированы выходные характеристики АИТ, которые расположены ниже номинальной кривой, что указывает на недостаточную выходную мощность и неоптимальный режим работы, при которых эксплуатируется АИТ. Поэтому регулировку выходного тока АИТ рекомендовано производить балластным резистором R_6 с сопротивлением меньшим, чем на других УКЗ, и тем самым снизить нагрузку на термогенератор, не изменяя выходных характеристик.

Установлено, что наиболее эффективно из пяти обследуемых АИТ на газопроводе-отводе к г. Режу эксплуатируется термогенератор на УКЗ-5, где достигнуты наилучшие выходные характеристики при относительно невысокой температуре на горячем спае.

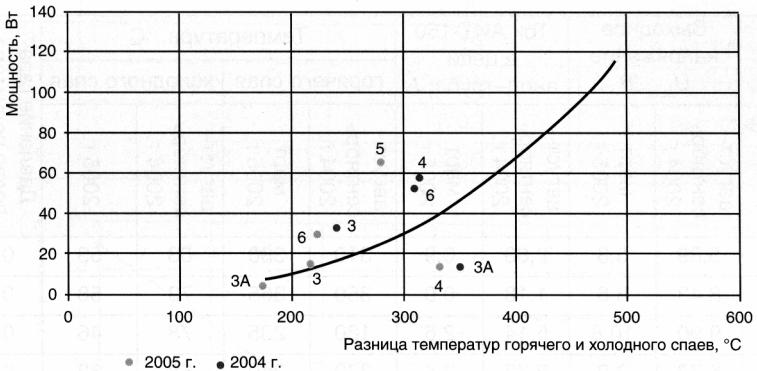


Рис. 5. Зависимость мощности АИТ от разности температур горячего и холодного спаев



Рис. 6. Зависимость мощности АИТ от суммарного сопротивления внутренней и внешней цепей

Результаты определения режимов работы АИТ, расположенных на газопроводе-отводе к г. Алапаевску, представлены в табл. 6.

Таблица 6

Режимы работы АИТ на газопроводе-отводе к г. Алапаевску

УКЗ	Выходное напряжение $U_{\text{Вых}}$, В		Ток АИТ-150 в цепи анод–труба, А		Температура, °С				Давление газа после редуктора (март 2005 г.), МПа
					горячего спая		холодного спая		
	август– сентябрь 2004 г.	март 2005 г.	август– сентябрь 2004 г.	март 2005 г.	август– сентябрь 2004 г.	март 2005 г.	август– сентябрь 2004 г.	2005 г.	
1	5,89	5,8	2,68	0,9	310	380	63	53	0,1
3	8,43	8,8	1,18	0,9	350	365	73	58	0,7
3-1	9,90	10,8	5,14	2,6	180	235	78	46	0,8
9	5,73	8,0	2,72	2,4	220	240	58	33	0,8
11	9,09	10,1	3,52	3,8	210	260	–	61	0,6

На УКЗ-1 и УКЗ-3 на газопроводах, питающих термогенератор, ИФ установлены в местах его врезки, вследствие чего образуется незащищенный подземный участок газопровода длиной до 50 м. Необходимо учитывать, что незащищенный подземный участок газопровода расположен в зоне действия блуждающих токов и имеет электрический контакт с укрытием и корпусом термогенератора. Скорость коррозионного процесса, оцененная с помощью зонд-модульной технологии на газопроводе УКЗ-3, составляет 0,6 мм/год.

В точке дренажа обследуемых УКЗ проводилась регистрация защитных потенциалов измерения, которая выполнялась с помощью ЭНЕС в 2004 г. и ЗМ (табл. 7).

На рис. 7 представлены зависимости выходного тока от напряжения отдельно по каждому термогенератору по трем точкам: на «холодном ходу», с нагрузкой 5 и 10 Ом и цепи труба-анод. При этом температура каждого АИТ оставалась неизменной. Для сравнения полученных значений между собой была построена вольт-амперная ха-

Таблица 7

Защитные потенциалы в точках дренажа УКЗ, работающих от АИТ

Номер УКЗ	Средний потенциал в 2004 г., В	Средний потенциал в 2005 г., В	Средний ток ЗМ, мА
1	–1,15	–0,96	–1,7 (катодный)
3	–1,30	–1,19	–4,6 (катодный)
3-1	–0,38	–1,34	–5,2 (катодный)
9	–1,28	–3,02	–4,3 (катодный)
11	–1,04	–1,30	–6,4 (катодный)

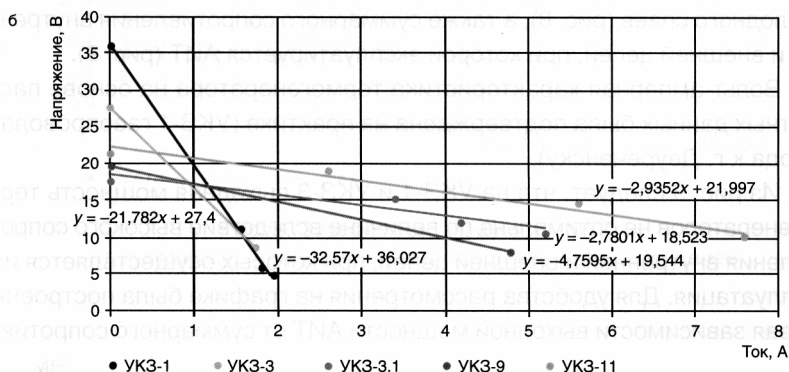
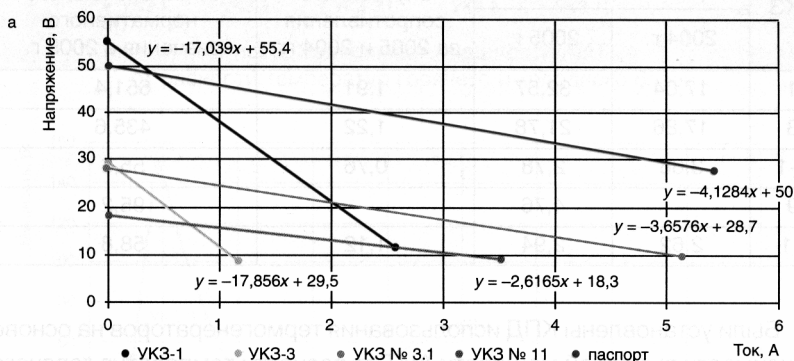


Рис. 7. Сравнение вольт-амперных характеристик АИТ газопровода-отвода к г. Алапаевску в 2004 г. (а) и 2005 г. (б)

рактеристика на основе паспортных данных. Характеристики каждого термогенератора объединены линейной функцией по полученным точкам, а также приведены их уравнения.

По результатам мониторинга в двухгодичном интервале времени можно утверждать, что с увеличением срока эксплуатации внутреннее сопротивление обследуемых АИТ возрастает (табл. 8).

Таблица 8

Внутреннее сопротивление АИТ за 2004 и 2005 гг.

УКЗ	Внутреннее сопротивление АИТ, Ом		Отношение внутреннего сопротивления за 2005 и 2004 гг.	Процент от максимального нормативного значения в 2005 г.
	2004 г.	2005 г.		
1	17,04	32,57	1,91	651,4
3	17,86	21,78	1,22	435,6
3-1	3,66	2,78	0,76	55,6
9	–	4,76	–	95,2
11	2,62	2,94	1,12	58,8

Были установлены КПД использования термогенераторов на основе зависимости выходной мощности АИТ от разности температур горячего и холодного спаев (рис. 8), а также суммарного сопротивления внутренней и внешней цепей, при которой эксплуатируется АИТ (рис. 9).

Вольт-амперная характеристика термогенератора на основе паспортных данных была подтверждена на практике (УКЗ-1 газопровода отвода к г. Дзуреченску).

Из рис. 9 следует, что на УКЗ-1 и УКЗ-3 выходная мощность термогенераторов не оптимальна по величине вследствие высокого сопротивления внутренней и внешней цепей, при которых осуществляется их эксплуатация. Для удобства рассмотрения на графике была построена кривая зависимости выходной мощности АИТ от суммарного сопротив-

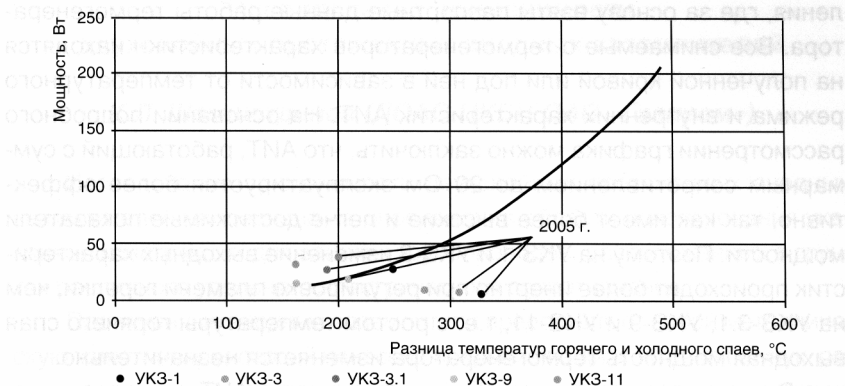


Рис. 8. Зависимость мощности АИТ от разности температур горячего и холодного спаев

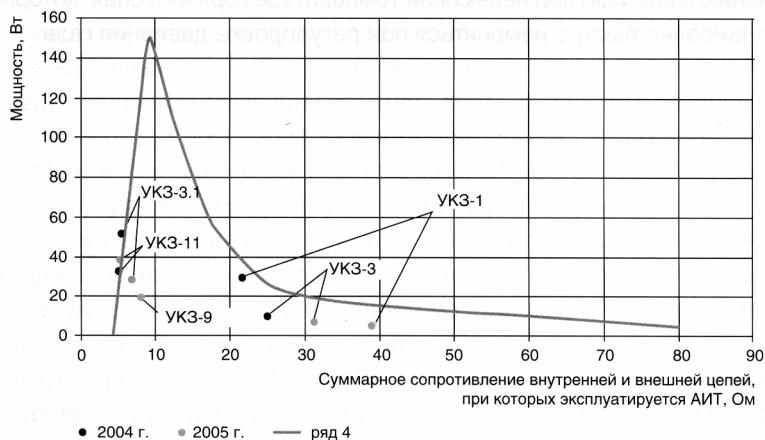


Рис. 9. Зависимость мощности АИТ от суммарного сопротивления внутренней и внешней цепей

ления, где за основу взяты паспортные данные работы термогенератора. Все снимаемые с термогенераторов характеристики находятся на полученной кривой или под ней в зависимости от температурного режима и внутренних характеристик АИТ. На основании подробного рассмотрения графика можно заключить, что АИТ, работающий с суммарным сопротивлением до 20 Ом эксплуатируется более эффективно, так как имеет более высокие и легче достижимые показатели мощности. Поэтому на УКЗ-1 и УКЗ-3 изменение выходных характеристик происходит более инертно при регулировке пламени горелки, чем на УКЗ-3.1, УКЗ-9 и УКЗ-11, т.е. с ростом температуры горячего спая выходная мощность термогенератора изменяется незначительно.

В итоге установлено, что из пяти обследуемых АИТ на газопроводе отводе к г. Алапаевску наиболее эффективно эксплуатируется термогенератор на УКЗ-11. Он имеет лучшие выходные характеристики по сравнению с другими при невысокой температуре горячего спая, которые будут наиболее быстро изменяться при регулировке давления газа.