

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 53.084.4: 621.311.25

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-08>

EDN TGXPIS

Оригинальная статья / Original paper



Анализ погрешности тарировки электропривода запорной арматуры АЭС

А.А. Лапкис^{1,2} , Л.В. Цыхлер¹ , В.Н. Никифоров¹ , В.П. Егорова¹ 

¹ Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

² Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Ростовская АЭС, г. Волгодонск, Ростовская обл.,
Российская Федерация
 AALapkis@mephi.ru

Аннотация. В статье описан результат исследований, нацеленных на разработку переносного комплекса для проведения оперативной безразборной диагностики и тарировки ограничителей крутящего момента электроприводной арматуры (ЭПА) по месту ее эксплуатации (ПК ОКМП). Описаны концепция и методика тарировки электропривода по месту его установки на ЭПА. Приведено описание программно-технического комплекса, реализующего данную концепцию. Описаны основные результаты испытаний комплекса, которые показали его применимость для выполнения диагностики ЭПА на АЭС. Выполнены статистические испытания в целях разработки и аттестации методик измерения. Для этого проведен анализ неопределенности результата тарировки электропривода, которую вносит сама процедура тарировки. Показано, что влияние датчика крутящего момента, устанавливаемого с помощью специально разработанной оснастки между арматурой и электроприводом, незначимо и влияет только на второстепенные диагностические параметры. Таким образом, подтверждена возможность совмещения операций базового испытания электропривода и технического диагностирования ЭПА. Полученные результаты испытаний использованы для составления и метрологической аттестации методики прямого и косвенного измерения крутящего момента ЭПА по месту ее эксплуатации.

Ключевые слова: арматура, АЭС, электропривод, крутящий момент, базовые испытания, техническая диагностика, тарировка, погрешность, метрологическая аттестация.

Для цитирования: Лапкис А.А., Цыхлер Л.В., Никифоров В.Н., Егорова В.П. Анализ погрешности тарировки электропривода запорной арматуры АЭС. Глобальная ядерная безопасность. 2024;14(4):80–90. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-08>

For citation: Lapkis A.A., Tsykhler L.V., Nikiforov V.N., Egorova V.P. Analysis of calibration error of NPP shut-off valve electric drive. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):80–90. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-08>

Analysis of calibration error of NPP shut-off valve electric drive

Aleksandr A. Lapkis^{1,2} , Lev V. Tsykhler¹ , Viktor N. Nikiforov¹ ,
Vera P. Egorova¹ 

¹ Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

² Rostov Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region,
Russian Federation
 AALapkis@mephi.ru

Abstract. The article describes the result of the research aimed at the development of a portable complex for carrying out rapid, non-disassembly diagnostics and calibration of torque limiters of motor operated valves at the place of their operation (multimedia training program). The concept and methodology of electric drive calibration at the place of its installation on the motor operated valves is described. The description of the software and hardware complex realizing this concept is given. The main test results of the complex which showed its applicability for motor operated valves diagnostics at NPPs are described. Statistical tests are performed in order to develop and certify measurement tech-

niques. The uncertainty of the electric drive calibration result which is introduced by the calibration procedure itself is analysed. It is shown that the influence of torque sensor installed with the help of specially designed tooling between valve and electric drive is insignificant and affects only minor diagnostic parameters. Thus, the possibility of combining the operations of the basic drive testing and technical diagnostics of an electric drive has been confirmed. The obtained test results are used for the development and metrological certification of the methodology of direct and indirect torque measurement of the motor operated valves at the place of its operation.

Keywords: valves, NPP, electric drive, torque, basic tests, technical diagnostics, calibration, error, metrological certification.

Общие положения

Значительная часть дефектов электроприводной арматуры (ЭПА) АЭС, возникающих при эксплуатации, представляет собой негерметичность в затворе и различного рода дефекты подвижных частей – тугой ход, низкая плавность хода, заклинивание, отсутствие затяга запорного органа, отрыв штока и т.д. Часть таких дефектов носит износный характер, а часть – обусловлена некорректной настройкой моментных и концевых выключателей привода [1,2]. Некорректное значение крутящего момента привода, передаваемое на запорный орган ЭПА, может привести как к негерметичности в затворе, так и к повреждениям подвижных частей арматуры.

Чтобы при эксплуатации определить крутящий момент, развиваемый электроприводом арматуры, нужно измерить потребляемую им мощность и пересчитать ее в момент по тарировочной характеристике. Эта процедура предусмотрена действующим стандартом АО «Концерн Росэнергоатом»¹ как часть базовых испытаний электропривода.

Разработка диагностического комплекса

С целью повышения качества выявления как износных дефектов, так и проблем настройки электропривода, НИИ атомного энергетического машиностроения (НИИ АЭМ) ВИТИ НИЯУ МИФИ выполнил в 2022-2024 гг. в интересах АО «Концерн Росэнергоатом» НИОКР по разработке переносного диагностического комплекса.

«Переносной комплекс для проведения оперативной безразборной диагностики и тарировки ограничителей крутящего момента ЭПА по месту ее эксплуатации» (ПК ОКМП) совмещает функции оперативной диагностики ЭПА по сигналам силы тока и напряжения питающей сети привода с его тарировкой путем одновременной регистрации указанных электрических параметров и крутящего момента по месту эксплуатации ЭПА. Для более качественного и оптимизированного планово-предупредительного ремонта требуется сокращение объемов работ в данный период [3], с чем поможет использование ПК ОКМП. ПК ОКМП включает преимущественно российские и белорусские компоненты: измерительный преобразователь напряжения, первичные преобразователи силы тока, напряжения и крутящего момента.

Тарировка электропривода обеспечивается путем одновременной регистрации электрических сигналов и фактического крутящего момента электропривода на месте его установки на ЭПА. Методические основы такой тарировки были заложены предыдущими работами НИЯУ МИФИ [4]. В настоящее время известны ЭПА со встроенными датчиками момента, что позволяет проводить одновременную регистрацию описанных выше параметров [5], но данное оборудование требует больших затрат на ввод его в эксплуатацию на АЭС. Поэтому подавляющее количество электроприводов запорной арматуры на атомных станциях России не имеет встроенного датчика момента, что требует их тарировки на стенде² или с по-

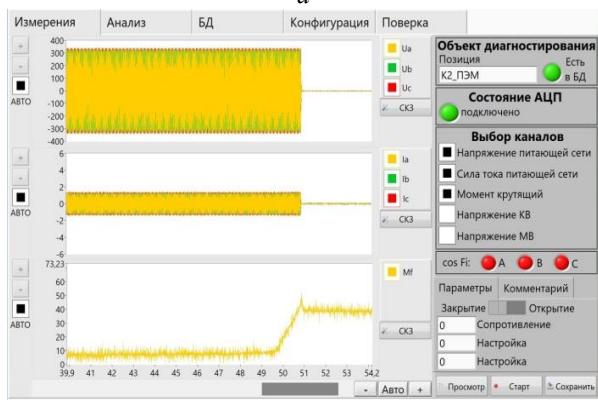
¹ СТО 1.1.1.02.002.1857-2021. Техническое диагностирование электроприводной трубопроводной промышленной арматуры на энергоблоках атомных станций. – АО «Концерн Росэнергоатом». – Стандарт организации. – Москва, 2021. – 60 с.

² АО «Атомтехэнерго» представило свои инновационные разработки. АО «Атомтехэнерго». – Режим доступа: <https://atech.ru/news/ao-atomtekhenenergo-predstavilo-svoe-innovatsionnye-razrabotki/> (дата обращения: 02.07.2024).

мощью подключения внешнего датчика. Для установки датчика крутящего момента между арматурой и электроприводом применяется специально разработанная оснастка. К настоящему моменту разработан ряд комплектов оснастки для приводов с присоединительными размерами, соответствующими ГОСТ 34287-2017³. Общий вид комплекса в процессе тарировки электропривода на стенде ВИТИ НИЯУ МИФИ показан на рисунке 1а, экранная форма регистрации сигналов – на рисунке 1б.



а



б

Рисунок 1. а – Тарировка привода задвижки DN150 с помощью ПК ОКМП на стенде ВИТИ НИЯУ МИФИ; б – Экранная форма регистрации ПК ОКМП, затяг клиновой задвижки

Figure 1. а – DN150 gate valve drive calibration with the help of multimedia training program at VETI MEPhI bench; б – Multimedia training program registration screen form, wedge gate valve tightening

³ ГОСТ 34287-2017. Межгосударственный стандарт Арматура трубопроводная. Приводы вращательного действия. Присоединительные размеры. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200161191> (дата обращения: 02.07.2024).

Испытания показали, что тарировочная характеристика может быть получена даже при однократной регистрации электрических сигналов и момента при обычном рабочем цикле ЭПА. На рисунках 2–5 показаны соответствующие сигналы и тарировочная характеристика привода арматуры, отображенная на рисунке 1.

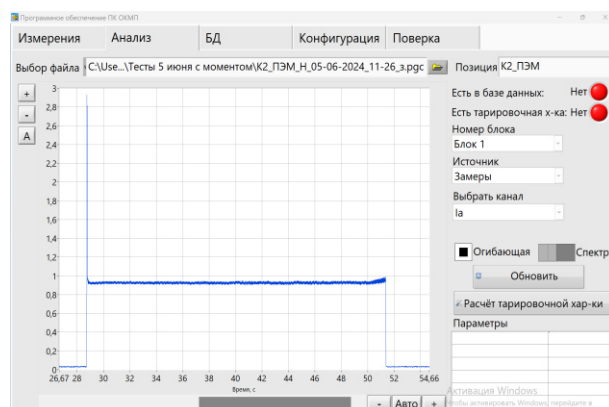


Рисунок 2. Огибающая силы тока при закрытии ЭПА
Figure 2. Current envelope during closing of the motor operated valve

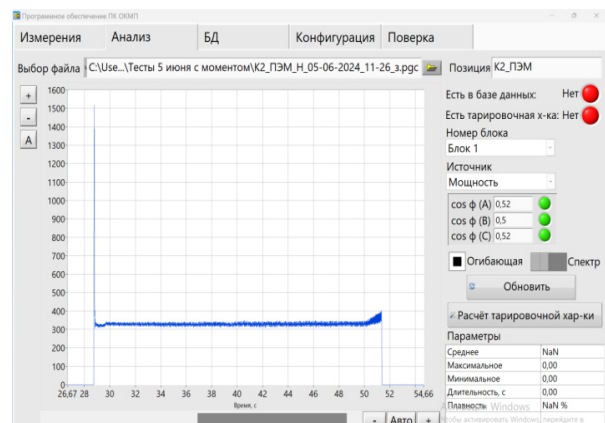


Рисунок 3. Огибающая мощности при закрытии ЭПА
Figure 3. Power envelope at closing of the motor operated valve



Рисунок 4. Измеренный момент при закрытии ЭПА
Figure 4. Measured torque at closing of the motor operated valve



Рисунок 5. Тарировочная характеристика привода при закрытии ЭПА

Figure 5. Drive calibration characteristic at closing of the motor operated valve

Анализ погрешности

При диагностике и тарировке электропривода трубопроводной арматуры «потребителя» – как правило, это цех-владелец – интересует степень достоверности полученного результата. Неопределенность измерений электрических параметров, крутящего момента, процедуры расчета тарировочной характеристики, неопределенность во времени срабатывания моментного выключателя порождают погрешность в определении крутящего момента затяга арматуры при ее штатной оперативной диагностике. То есть значения диагностических параметров (рабочий ток, плавность хода, мощность и момент затяга) являются оценками случайных величин. Поэтому при диагностировании ЭПА назревает необходимость перехода от точечных оценок диагностических параметров, общепринятых сейчас, к интервальным. В рамках действующей системы единства измерений корректная интервальная оценка является результатом применения аттестованной методики измерения. Такая методика «приписывает» каждой прямо и косвенно измеряемой величине погрешность, вычисляемую с заданной доверительной вероятностью на основе многократных измерений величины в сопоставимых условиях.

При измерениях электрических параметров электропривода с целью диагностики ЭПА используют методики измерений, которые, как правило, завершаются расчетом рабочего тока и плавности хода. В рамках разработки ПК ОКМП были проведены многократные эксперименты с целью создания и

аттестации методик в соответствии с ГОСТ Р 8.563-2009⁴, ГОСТ Р 8.1015-2022⁵:

- методика диагностирования и тарировки электропривода ЭПА;

- методики измерения диагностических величин: силы тока и напряжения питающей сети, прямого измерения крутящего момента, косвенного измерения крутящего момента по электрическим сигналам.

Последовательность расчета крутящего момента показана на рисунке 6.

В таблице 1 приведены результаты измерения электрических параметров и крутящего момента электропривода типа Б на задвижке 30с941нж DN150 в составе экспериментального стенда ВИТИ НИЯУ МИФИ (см. рис. 6).

Далее проведена оценка погрешности расчетных и измеренных параметров в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011⁶, ГОСТ Р 8.997-2021⁷.

В таблице 2 приведен аналогичный набор параметров, полученной на задвижке DN125 с приводом ПЭМ типа А в составе учебного стенда АНО ДПО «Техническая академия Росатома» (рис. 7).

⁴ ГОСТ Р 8.563-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200077909> (дата обращения: 10.07.2024)

⁵ ГОСТ Р 8.1015-2022. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая экспертиза нормативной и технической документации в области использования атомной энергии. Организация и основные требования к содержанию. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200194401> (дата обращения: 01.07.2024)

⁶ ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200089016> (дата обращения: 13.07.2024).

⁷ ГОСТ Р 8.997-2021. Государственная система обеспечения единства измерений. Алгоритмы оценки метрологических характеристик при аттестации методик измерений в области использования атомной энергии. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200179190> (дата обращения: 11.07.2024).

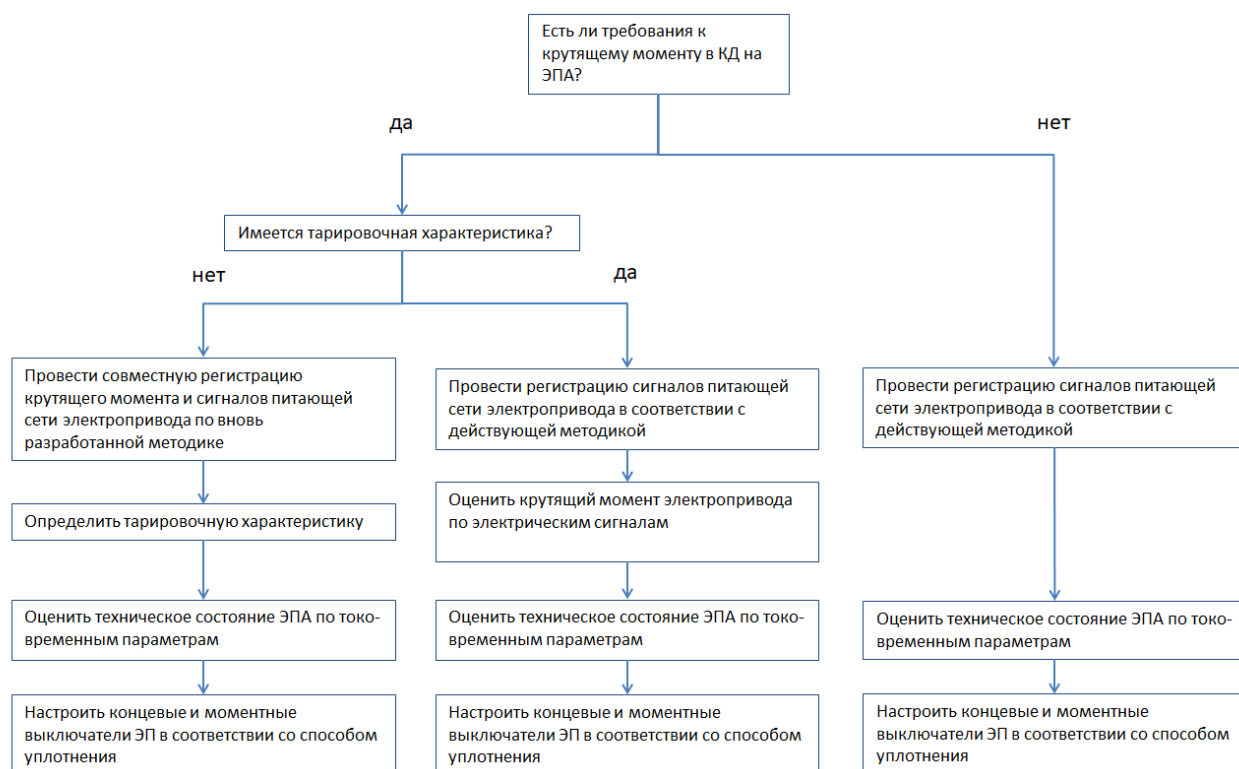


Рисунок 6. Алгоритм расчета крутящего момента

Figure 6. Torque calculation algorithm



Рисунок 7. Измерения на стенде АНО ДПО «Техническая академия Росатома»

Figure 7. Rosatom Technical Academy bench measurements

Для оценки технического состояния ЭПА по методикам⁸ используют набор более чем из 30 параметров, являющихся результатом

⁸ МТ 1.2.3.02.999.0085-2010 «Диагностирование трубопроводной арматуры. Методика», НИИ «Энергомашиностроения», 2010. 127 с.; МТ 1.2.1.15.1175-2016. Диагностирование трубопроводной электроприводной арматуры. Методика. АО «Концерн Росэнергоатом». Стандарт организации. Смоленск, 2016. 145 с.

обработки исходных сигналов диагностических величин: сила тока, напряжение, крутящий момент. При этом процедура экспресс-анализа подразумевает оценку по ограниченному набору параметров, описанному ниже.

Для расчета диагностических параметров используют демодулирование сигналов – удаление из них гармоники сетевого напряжения (50 Гц) как не несущей диагностической информации. В данной работе для этого использовано взятие огибающей методом скользящего среднеквадратического значения, где периодом усреднения принят один период сетевой гармоники (1/50 секунды).

Огибающая сигнала X определяется по формуле (1):

$$RMS(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n X^2}{n}}, \quad (1)$$

где n – количество отсчетов величины.

Этой операции подвергаются сигналы силы тока по фазам А, В, С.

Рассчитывают сигнал мгновенных значений мощности по формуле (2):

$$P = U_A \times I_A + U_B \times I_B + U_C \times I_C, \quad (2)$$

где U_A, U_B, U_C – напряжения по фазам; I_A, I_B, I_C – силы тока по фазам, после чего его также подвергают демодуляции по формуле (1).

Выполняют ручную фрагментацию сигнала, то есть указывают на нем характерные участки рабочего цикла ЭПА. Пример такой фрагментации приведен на рисунке 8.

Определяют диагностические параметры. В качестве примера рассмотрены основные: рабочий ток и плавность хода.

Рабочий ток определяется как среднее значение огибающей тока рабочего хода после взятия огибающей сигнала.

Рабочая мощность определяется выражением (3):

$$P = U_{Amean} \times I_{Amean} + U_{Bmean} \times I_{Bmean} + U_{Cmean} \times I_{Cmean}, \quad (3)$$

где $U_{Amean}, U_{Bmean}, U_{Cmean}$ – рабочие напряжения по фазам;

$I_{Amean}, I_{Bmean}, I_{Cmean}$ – рабочие силы тока по фазам.

Плавность хода по току или мощности определяется формулой (4):

$$\gamma_X = 100\% \times (1 - \frac{X_{max} - X_{min}}{X_{mean}}), \quad (4)$$

где $X_{max}, X_{mean}, X_{min}$ – максимальные, средние, минимальные значения огибающей тока или мощности.

Крутящий момент на валу электропривода измеряется напрямую.

Результаты многократной тарировки исследуемых клиновых задвижек DN150 и DN125 сведены в таблицы 1 и 2. В качестве измеряемого результата рассматривается коэффициент связи $K_{св}$, имеющий физический смысл тангенса угла наклона тарировочной характеристики (рис. 5) и размерность Н·м/Вт.

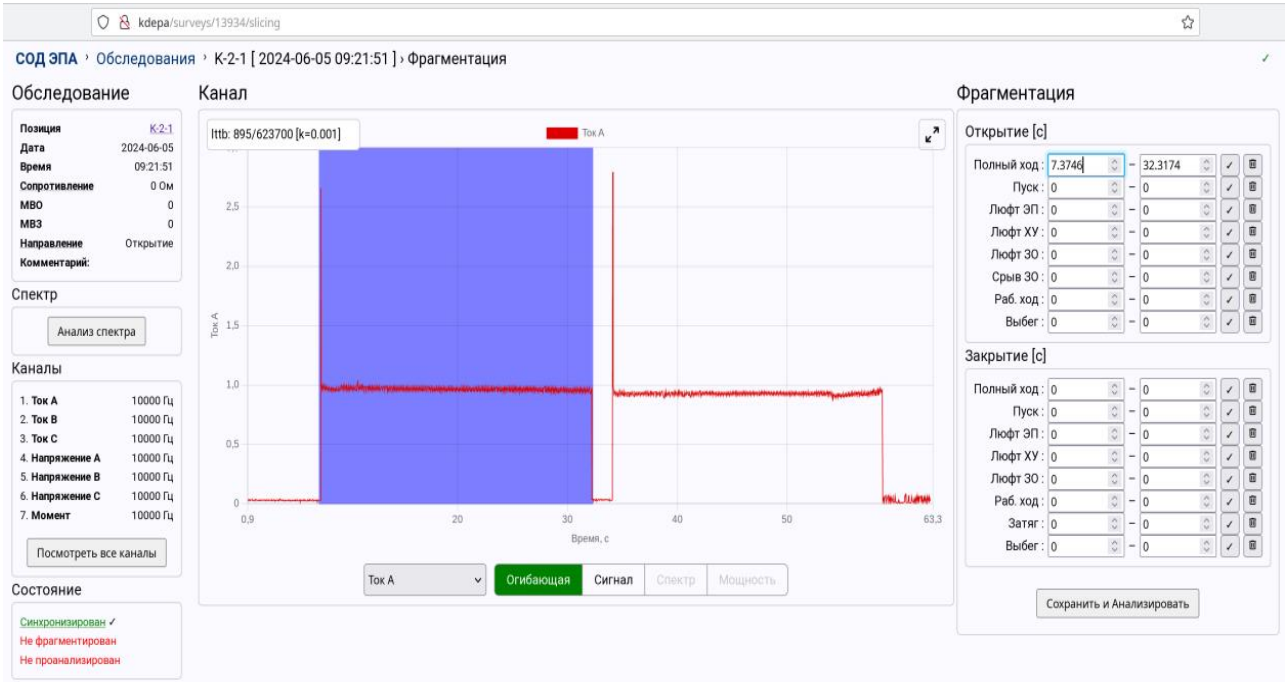


Рисунок 8. Стационарный модуль ПК ОКМП. Фрагментация диагностического сигнала
Figure 8. Stationary module of multimedia training program. Diagnostic signal fragmentation

Таблица 1. Результаты анализа случайной погрешности при тарировке электропривода задвижки DN150
Table 1. Analysis results of random error during calibration of electric motor drive gate valve DN150

Номер опыта	Коэффициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затыга ЭПА, Н·м	Номер опыта	Коэф-фициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затыга ЭПА, Н·м
1	0,147	228,9	9	0,166	214,9
2	0,147	228,9	10	0,171	210,9
3	0,149	222,9	11	0,168	211,9
4	0,148	226,9	12	0,155	213,9
5	0,156	217,9	13	0,164	213,9
6	0,148	226,9	14	0,167	208,9

Номер опыта	Коэффициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затыга ЭПА, Н·м	Номер опыта	Коэф-фициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затыга ЭПА, Н·м
7	0,155	216,9	15	0,169	210,9
8	0,156	217,9	16	0,153	212,9
Результаты обобщения					
Величина			Коэффициент связи		Расчетный крутящий момент затыга ЭПА
Математическое ожидание			0,157 Н·м/Вт		217,8 Н·м
Стандартное отклонение			0,008 Н·м/Вт		6,88 Н·м
Относительная погрешность (коэффициент вариации)			5,3 %		3,2 %

Таблица 2. Результаты анализа случайной погрешности при тарировке электропривода задвижки DN125**Table 2.** Analysis results of random error during calibration of electric motor drive gate valve DN125

Номер опыта	Коэффициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затыга ЭПА, Н·м	Номер опыта	Коэффициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затыга ЭПА, Н·м
1	0,621	46,675	9	0,700	50,875
2	0,602	42,075	10	0,666	46,175
3	0,573	48,975	11	0,629	52,375
4	0,637	48,275	12	0,592	45,175
5	0,629	48,175	13	0,657	51,275
6	0,624	48,375	14	0,620	50,075
7	0,631	46,375	15	0,564	52,875
8	0,700	50,875	16	0,600	51,175
Результаты обобщения					
Величина			Коэффициент связи		Расчетный крутящий момент затыга ЭПА
Математическое ожидание			0,623 Н·м/Вт		48,6 Н·м
Стандартное отклонение			0,035 Н·м/Вт		2,96 Н·м
Относительная погрешность (коэффициент вариации)			5,6 %		6,1 %

Испытания в целях утверждения типа средства измерения показали, что погрешность измерения крутящего момента ПК ОКМП не превышает 0,6–0,8 Н·м. Таким образом, общая погрешность тарировки может быть определена как суперпозиция погрешности снятия тарировочной характеристики и погрешности расчета по ней крутящего момента.

Итоговая погрешность составила не более 6,5 % от действующей величины момента затыга. Учитывая требование НП-068-05⁹ по 10%-й точности срабатывания ОКМП привода, результаты тарировки могут считаться достоверными и корректно описывать техническое состояние и правильность

настройки блока выключателей электропривода арматуры АЭС.

Для оценки влияния на неопределенность самой процедуры тарировки выполнены множественные измерения электрических параметров на той же арматуре (DN125, стенд АНО ДПО «Техническая академия Росатома») без установленного датчика крутящего момента. Результаты сопоставления приведены в таблице 3. Различие между выборками определено как возможность их объединения по критерию Стьюдента [7].

Для параметров, по которым результаты измерения с датчиком крутящего момента (ДКМ) и без него неоднородны, проведено сопоставление расхождения результатов и погрешности их измерения. Результат приведен в таблице 4.

Результаты показали, что оснастка для измерения крутящего момента по месту эксплуатации ЭПА влияет только на время выбега двигателя, увеличивая его приблизительно на 10%. Прочие параметры, полученные в процессе тарировки привода,

⁹ НП-068-05. Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования. – Режим доступа: http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/about/AKTS/НП-068-05%20Трубопроводная%20арматура%20для%20атомных%20станций.%20Общие%20технические%20требования_Текст.pdf (дата обращения: 08.07.2024).

могут быть использованы для оперативной диагностики, поскольку на них наличие или отсутствие оснастки с ДКМ не влияет.

Таблица 3. Влияние датчика крутящего момента на замеренные параметры ЭПА

Table 3. Influence of the torque sensor on the motor operated valves measured parameters

Параметр	Значение без установленного датчика крутящего момента	Значение с установленным датчиком крутящего момента	Объединение выборок с доверительной вероятностью 95% , $t_{кр} = 2,045$
Закрытие			
Рабочий ток, фаза А, А	$0,9294 \pm 0,004453$	$0,9301 \pm 0,004011$	$t = 0,485$ Допустимо
Рабочий ток, фаза В, А	$0,8391 \pm 0,01664$	$0,8373 \pm 0,005228$	$t = 0,398$ Допустимо
Рабочий ток, фаза С, А	$0,9529 \pm 0,006937$	$0,9591 \pm 0,005701$	$t = 2,660$ Недопустимо
Рабочая мощность, Вт	$339,8 \pm 2,267$	$328,05 \pm 4,338$	$t = 9,304$ Недопустимо
Ток затыга, фаза А, А	$0,9892 \pm 0,01054$	$0,9950 \pm 0,004231$	$t = 1,980$ Допустимо
Ток затыга, фаза В, А	$0,8956 \pm 0,02077$	$0,89775 \pm 0,005635$	$t = 0,395$ Допустимо
Ток затыга, фаза С, А	$1,0150 \pm 0,02171$	$1,0223 \pm 0,007284$	$t = 1,236$ Допустимо
Мощность затыга, Вт	$419,1 \pm 22,76$	$400,2 \pm 3,647$	$t = 3,183$ Недопустимо
Плавность хода по току, фаза А, %	$95,061 \pm 0,8270$	$94,27 \pm 0,6104$	$t = 2,981$ Недопустимо
Плавность хода по току, фаза В, %	$94,19 \pm 0,9270$	$93,48 \pm 0,3835$	$t = 2,756$ Недопустимо
Плавность хода по току, фаза С, %	$94,86 \pm 1,0782$	$94,25 \pm 0,7762$	$t = 1,790$ Допустимо
Плавность хода по мощности, %	$87,63 \pm 1,186$	$88,73 \pm 0,8916$	$t = 2,867$ Недопустимо
Время выбега двигателя, с	$0,08567 \pm 0,01011$	$0,09427 \pm 0,00475$	$t = 2,983$ Недопустимо
Открытие			
Рабочий ток, фаза А, А	$0,9606 \pm 0,004838$	$0,9688 \pm 0,006666$	$t = 3,886$ Недопустимо
Рабочий ток, фаза В, А	$0,8498 \pm 0,005522$	$0,8514 \pm 0,004387$	$t = 0,892$ Допустимо
Рабочий ток, фаза С, А	$0,9461 \pm 0,004914$	$0,9477 \pm 0,008979$	$t = 0,620$ Допустимо
Рабочая мощность, Вт	$343,9 \pm 1,979$	$338,2 \pm 2,377$	$t = 7,22$ Недопустимо
Ток срыва, фаза А, А	$1,0295 \pm 0,0004151$	$1,0316 \pm 0,009417$	$t = 0,373$ Допустимо
Ток срыва, фаза В, А	$0,9179 \pm 0,02192$	$0,91567 \pm 0,008034$	$t = 0,385$ Допустимо
Ток срыва, фаза С, А	$1,0216 \pm 0,02672$	$1,0191 \pm 0,008781$	$t = 0,354$ Допустимо
Мощность срыва, Вт	$442,092 \pm 32,91$	$431,5 \pm 9,347$	$t = 1,234$ Допустимо
Плавность хода по току, фаза А, %	$92,44 \pm 0,8273$	$92,24 \pm 0,5623$	$t = 3,471$ Недопустимо
Плавность хода по току, фаза В, %	$91,88 \pm 0,9964$	$91,44 \pm 0,7432$	$t = 1,420$ Допустимо
Плавность хода по току, фаза С, %	$93,088 \pm 0,8611$	$92,91 \pm 1,367$	$t = 0,435$ Допустимо
Плавность хода по мощности, %	$83,42 \pm 1,0701$	$83,11 \pm 1,271$	$t = 0,720$ Допустимо

Параметр	Значение без установленного датчика крутящего момента	Значение с установленным датчиком крутящего момента	Объединение выборок с доверительной вероятностью 95% , $t_{кр} = 2,045$
Время выборки люфтов при открытии, с	$1,502 \pm 0,031$	$1,501 \pm 0,017$	$t = 0,194$ Допустимо

Таблица 4. Сопоставление расхождения результатов измерений с погрешностью**Table 4.** Comparison of the difference between the measurement results and the uncertainty

Параметр	Абсолютная разность мат. ожиданий при измерениях с ДКМ и без ДКМ	Относительная разность мат. ожиданий при измерениях с ДКМ и без ДКМ	Относительная погрешность прямого или косвенного измерения	Значимость расхождения
Закрытие				
Рабочий ток, фаза С	0,0008 А	0,081 %	2,5 %	Незначимо
Рабочая мощность	11,76 Вт	3,460 %	4,75 %	Незначимо
Мощность затяга	18,94 Вт	4,519 %	4,75 %	Незначимо
Плавность хода по току, фаза А	0,791 %	0,832 %	4,33 %	Незначимо
Плавность хода по току, фаза В	0,714 %	0,758 %	4,33 %	Незначимо
Плавность хода по мощности	1,098 %	1,253 %	8,23 %	Незначимо
Время выбега двигателя	0,00861 с	10,0467 %	5,84 %	Значимо
Открытие				
Рабочий ток, фаза А	0,00818 А	0,851 %	2,5 %	Незначимо
Рабочая мощность	5,69 Вт	1,66 %	4,75 %	Незначимо
Плавность хода по току, фаза А	0,877 %	0,942 %	4,33 %	Незначимо

Заключение

Показана принципиальная техническая возможность проведения тарировки электропривода по месту его эксплуатации, совмещенной с оперативной технической диагностикой по электрическим сигналам. Разработан переносной диагностический комплекс для решения этих задач.

Впервые выполнена оценка неопределенности и разработаны методики измерения косвенно определяемых диагностических параметров, включая момент затяга ЭПА. На экспериментальных образцах показано, что погрешность тарировки укладывается в

нормы НП-068-05, а влияние оснастки и датчиков, применяемых при тарировке, на диагностические параметры малозначимо, за исключением времени выбега привода.

В результате внедрения результатов НИОКР специализированные подразделения атомных станций АО «Концерн Росэнергоатом» получают новые возможности по контролю технического состояния ЭПА. Опытная эксплуатация разработанного комплекса пройдет на Нововоронежской АЭС, после этого разработка может быть применена на других АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мозжечков В.А., Холматов А.З. Автоматическое управление моментом силы уплотнения электроприводной трубопроводной арматуры. *Известия тульского государственного университета. Технические науки.*

2015;9:185–190. Режим доступа: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2015_09&year=2015 (дата обращения: 03.07.2024).

Mozzhechkov V.A., Kholmatov A.Z. Automatic control of the moment of compaction force of electric drive pipe fittings. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2015;9:185–190. (In Russ.). Available at: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2015_09&year=2015 (accessed: 03.07.2024).

2. Подрезова И.С., Шутова Л.В., Ульянова Ю.Е., Пугачева О.Ю., Елзов Ю.Н. Анализ причин заклинивания и обрывов штоков трубопроводной электроприводной арматуры. *Глобальная ядерная безопасность*. 2014;4(13):32–37. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2014.4-5.pdf> (дата обращения: 04.07.2024).

Podrezova I.S., Shutova L.V., Ulyanova Yu.E., Pugacheva O.Yu., Elzhov Yu.N. Analysis of the causes of jamming and breakage of rods of pipeline electric valves. *Global nuclear safety*. 2014;4(13):32–37. (In Russ.). Available at: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2014.4-5.pdf> (accessed: 04.07.2024).

3. Фридберг Э.И., Сердюк А.В., Пинаева Е.Г., Завьялова М.И., Тарасьев Ю.И. Диагностическое обеспечение электроприводной арматуры АЭС. *Тяжелое машиностроение*. 2008;11:33–35. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=jvzhcz&ysclid=m3zkzl69y295947965> (дата обращения: 04.07.2024).

Friedberg E.I., Serdyuk A.V., Pinaeva E.G., Zavyalova M.I., Tarasyev Yu.I. Diagnostic support for electric drive valves of nuclear power plants. *Heavy engineering*. 2008;11:33–35. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=jvzhcz&ysclid=m3zkzl69y295947965> (accessed: 04.07.2024).

4. Лапкис А.А., Швец Д.В., Абидова Е.А., Дембицкий А.Е. Расчетный метод контроля состояния электропривода запорной арматуры. *Автоматизация в промышленности*. 2022;1:45–50. Режим доступа: https://avtprom.ru/system/files/DOI/2022/1/10_lapkis.pdf (дата обращения: 07.07.2024).

Lapkis A.A., Shvets D.V., Abidova E.A., Dembitsky A.E. Calculation method for monitoring the condition of the electric actuator of shut-off valves. *Automation in industry*. 2022;1:45–50. (In Russ.). Available at: https://avtprom.ru/system/files/DOI/2022/1/10_lapkis.pdf (accessed: 07.07.2024).

5. Мозжечков В.А., Савин А.С. Диагностика электроприводной трубопроводной арматуры с использованием датчика момента в составе червячного редуктора интеллектуального привода. *Автоматизация в промышленности*. 2011;11:38–41. Режим доступа: <https://avtprom.ru/article/diagnostika-elektroprivodnoi-tru> (дата обращения: 06.07.2024).

Mozzhechkov V.A., Savin A.S. Diagnostics of electric drive pipe fittings using a torque sensor as part of a worm gear of an intelligent drive. *Automation in industry*. 2011;11:38–41. (In Russ.). Available at: <https://avtprom.ru/article/diagnostika-elektroprivodnoi-tru> (accessed: 06.07.2024).

6. Орлов А.И. О проверке однородности двух независимых выборок. *Заводская лаборатория*. 2003;69(1):55–60. Режим доступа: https://www.analystsoft.com/ru/products/statplus/lib/homogen_check.php (дата обращения: 09.07.2024).

Orlov A.I. On checking the uniformity of two independent samples. *Factory laboratory*. 2003;69(1):55–60. (In Russ.). Available at: https://www.analystsoft.com/ru/products/statplus/lib/homogen_check.php (accessed: 09.07.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Лапкис А.А. – разработка концепции исследования, методических основ исследования метрологических характеристик комплекса, постановка эксперимента;

Цыхлер Л.В. – выполнение экспериментальных работ, обработка результатов;

Никифоров В.Н. – разработка технологии применения комплекса для тарировки трубопроводной арматуры, анализ нормативной базы атомной отрасли;

Егорова В.П. – применение методов математической статистики, метрологической нормативно-технической документации, разработка методик измерения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Lapkis A.A. – development of the research concept, methodological foundations for the study of the metrological characteristics of the complex, setting up an experiment;

Tsykhler L.V. – execution of experimental work, processing of results;

Nikiforov V.N. – development of technology for the application of a complex for calibration of pipeline fittings, analysis of the regulatory framework of the nuclear industry;

Egorova V.P. – application of methods of mathematical statistics, metrological normative and technical documentation, development of measurement methods.

FUNDING:

No additional funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Александр Аркадьевич Лапкис, кандидат технических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; ведущий инструктор учебно-тренировочного подразделения, Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: AALapkis@mephi.ru

Лев Вадимович Цыхлер, лаборант-исследователь, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0006-2977-1572>

e-mail: lev.tsyhler@yandex.ru

Виктор Николаевич Никифоров, кандидат технических наук, директор, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0006-9508-9344>

e-mail: nii_energomash@mail.ru

Вера Петровна Егорова, главный специалист, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0007-2101-4910>

e-mail: ryabesnya@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Aleksandr A. Lapkis, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»; Senior Instructor of the Training Department, Rostov Nuclear Power Plant – branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: AALapkis@mephi.ru

Lev V. Tsykhler, Laboratory Researcher, SRI NPE, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0006-2977-1572>

e-mail: lev.tsyhler@yandex.ru

Viktor N. Nikiforov, Cand. Sci. (Eng.), SRI NPE, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0006-9508-9344>

e-mail: nii_energomash@mail.ru

Vera P. Egorova, Senior specialist, SRI NPE, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0007-2101-4910>

e-mail: ryabesnya@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 21.08.2024

После доработки / Revised 11.12.2024

Принята к публикации / Accepted 17.12.2024