

Диагностирование арматуры с электроприводом при помощи параметров активной мощности

А.В. Матвеев, к.т.н., начальник отдела, **А.Ф. Складников**, инженер, ЗАО «Диапром», г. Москва

Введение

Одной из важных задач предприятий, осуществляющих контроль технического состояния арматуры, является обеспечение диагностических подразделений эффективной методикой выявления неисправностей.

Эффективность методики заключается не только в высокой достоверности обнаружения неисправностей, но и в практической реализации систем сбора и обработки диагностической информации, основанной на достаточном числе измерительных каналов и контролируемых параметров.

Располагая информацией об обнаруженных признаках неисправностей, цех-владелец оборудования получает возможность оценки вероятного отказа арматуры и определения количества рабочих циклов, которые объект сможет выполнить до наступления отказа.

Главной характеристикой арматуры является обеспечение внутренней и внешней герметичности, которая обеспечивается путем перекрытия потока рабочей среды за установленный интервал времени, не допуская утечки рабочей среды наружу. Функцию обеспечения внутренней герметичности выполняет затвор, внешней — корпус, а функцию перемещения затвора — привод арматуры.

Одним из наиболее распространенных видов привода арматуры является электрический привод, оснащенный трехфазным двигателем с блоком конечных выключателей.

Арматура и электропривод изготавливаются в виде отдельных агрегатов и позволяют рассматривать их в виде отдельных объектов. В ряде случаев электропривод легко снять с арматуры, произвести его замену или ремонт. Для ремонта арматуры требуется ее полная разборка, что связано с вырезкой корпуса из трубопровода и является трудоемкой и дорогостоящей задачей.

Таким образом, диагностирование электроприводной арматуры состоит из двух основных частей:

- диагностирование арматуры;
- диагностирование электропривода.

Диагностирование электропривода, в свою очередь, можно разделить на задачи:

- диагностирование электродвигателя;
- диагностирование блока конечных выключателей;
- диагностирование механических передач редуктора.

Для решения задач диагностирования элементов арматуры и электропривода целесообразно применение методик, являющихся наиболее оптимальными для обнаружения той или иной неисправности. Выбор методики также может осуществляться исходя из вероятности наступления отказа в результате обнаруженной неисправности.

Методы контроля

В настоящее время подразделениями диагностики атомных станций применяются четыре основных метода контроля арматуры:

- виброакустический метод;
- метод контроля крутящего момента;
- метод контроля активной мощности электропривода;
- метод ультразвуковой локализации протечек.

Диагностическими параметрами данных методов являются акустические шумы арматуры и электрические параметры электропривода. Диагностирование производится путем регистрации и последующего анализа данных с определением характерных диагностических признаков неисправностей.

Виброакустический метод контроля широко используется в диагностике вращающегося оборудования и может применяться в части обнаружения неисправностей электродвигателя и электропривода одновременно с методами контроля активной мощности и крутящего момента. Для контроля электроприводов вибродиагностическим методом [1] используются сигналы тока или мгновенной мощности, входящие в состав измерительных файлов стационарных и переносных систем контроля [2], данный метод нашел широкое применение на Волгодонской АЭС.

Метод контроля крутящего момента фирмы Siemens, применяемый на Смоленской АЭС, подразумевает контроль усилия на штоке арматуры, пересчитываемого из крутящего момента и активной мощности электропривода. Исходными диагностическими данными для данного метода являются измеренные ток и напряжение по трем фазам, активная мощность, сигналы конечных выключателей и линейные коэффициенты пересчета соответствия активной мощности крутящему моменту арматуры.

В качестве основного диагностического параметра выступают активная мощность электропривода и сигналы конечных выключателей, регистрируемые при переходных процессах «открытия» и «закрытия». Контроль и анализ кривых активной мощности и сигналов конечных выключателей стал основой «Методики диагностирования арматуры с электроприводом» Д25107160700001ПМ, разработанной ЗАО «Диапром» в 2007 году по заказу ОАО «Концерн Энергоатом».

Наиболее эффективным методом определения протечек в затворе арматуры является метод прослушивания арматуры при помощи акустических датчиков или ультразвуковых локаторов. В настоящее время разработаны методы нормировки и численной оценки протечек [3].

Алгоритм диагностирования

Для запорной арматуры, применяемой на АЭС, возможно проведение замеров активной мощности электропривода во время срабатывания арматуры по циклу «открытие-закрытие» или регистрация данных по факту срабатывания в шкафах управления и контроля при наличии стационарных систем измерения, срабатывающих автоматически.

Замеры арматуры переносными средствами проводятся, как правило, при приемке из ремонта и выводе изделий в ремонт. Данные, полученные в ходе измерений, анализируются по ограниченному ряду параметров путем выполнения процедур так называемого «экспресс-анализа».

Для выполнения процедуры из исходной кривой первоначально определяют значения параметров в характерных точках кривой (пусковой ток, мощность «подрыва», рабочий ток, мощность «затяжки», время хода и др.)

Значения параметров, полученные для определенного типа арматуры и привода, проходят сравнение с опорными значениями на предмет соответствия установленному диапазону. Данная процедура идентична для каждого рассматриваемого параметра и не зависит от режима обработки (ручного или автоматического).

По значениям параметров в точках определяют наличие диагностических признаков характерных дефектов и контролируют изменение данных параметров со временем, прогнозируя развитие дефекта.

Диагностическая модель

Для установления соответствия между неисправностью и ее проявлениями в диагностических характеристиках, необходимо формализовать процессы, происходящие в арматуре при ее срабатывании на «открытие» или «закрытие», или иначе – разработать диагностическую модель арматуры с электроприводом.

Работа арматуры с электроприводом происходит за счет подвода электрической энергии, преобразующейся при помощи электродвигателя в крутящий момент и работу по передвижению элементов арматуры. В результате ускорения шестеренок редуктора, подшипников, ходовой гайки, перемещения механических частей под воздействием сил трения, происходит преобразование в работу и диссипация энергии.

Для разработки системы уравнений рассмотрим обобщенную кинематическую схему арматуры (рис. 1).

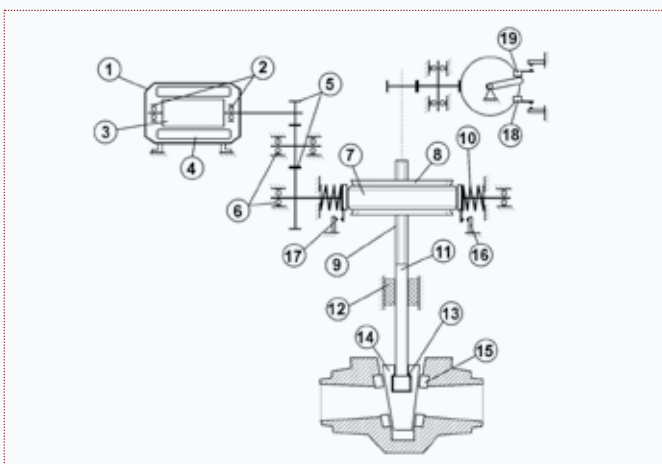


Рис. 1. Обобщенная кинематическая схема арматуры с электроприводом

На данной схеме приведены следующие элементы арматуры и привода: 1 – электродвигатель, 2 – подшипники электродвигателя, 3 – ротор электродвигателя, 4 – статор электродвигателя, 5 – зубчатые колеса редуктора, 6 – подшипники редуктора, 7 – червячный вал, 8 – ходовая гайка, 9 – ходовая резьба, 10 – пружины, 11 – шток, 12 – сальник, 13 – узел крепления запорного органа, 14 – запорный орган, 15 – седло посадки запорного органа, 16, 17 – моментные выключатели («открытия/закрытия»), 18, 19 – концевые выключатели («открытия/закрытия»).

Для приведения в движение арматуры используется источник электроэнергии, электродвигатель преобразует ее в механическое вращательное движение, которое посредством редуктора передается на ходовую гайку (рис. 1). Ходовая гайка приводит в движение шток с запорным органом, перемещение которого контролируется при помощи концевых и моментных выключателей [4].

На основании алгоритма работы и взаимодействия частей арматуры между собой и внешней средой, возможно построение диагностической модели, основанной на силовом взаимодействии электропривода и запорного органа. При построении диагностической модели учитываются упругие связи и распределение моментов инерции между частями электродвигателя, привода и запорного органа. Для описания системы дифференциальных уравнений модель арматуры и электропривода можно свести к двухмассовой упругой системе (рис. 2).



Рис. 2. Упрощенная модель арматуры с электроприводом

Главные инерционные массы описывают поведение электропривода и запорного органа, а упругая связь учитывает деформации внутри механизмов и пружин (рис. 1).

Система дифференциальных уравнений в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} M_{\delta\epsilon} - M_{\text{упр}} - M_{\delta I} &= J_{\delta\epsilon} (d\omega_{\delta\epsilon}/dt), \\ F_{\text{упр}} - F_{\delta 2} &= m_{3.o.} (dV_{3.o.}/dt), \\ M_{\text{упр}} &= C_{\text{упр}} (\varphi_{\text{пр}} - \varphi_{3.o.}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $M_{\delta\epsilon}$ – крутящий момент электродвигателя, $M_{\text{упр}}$, $F_{\text{упр}}$ – крутящий момент и сила на упругой связи, $M_{\delta I}$, $F_{\delta 2}$ – тормозящие моменты силы трения, возникающие в приводе и запорном органе, $J_{\delta\epsilon}$, $d\omega_{\delta\epsilon}$ – приведенные момент инерции и скорость вращения электродвигателя, $m_{3.o.}$, $V_{3.o.}$ – приведенная масса и скорость перемещения запорного органа, $C_{\text{упр}}$ – коэффициент упругой связи, $\varphi_{\text{пр}}$, $\varphi_{3.o.}$ – относительные перемещения привода и запорного органа.

Структурная схема для такой системы показана на рис. 3.

На схеме главные инерционные массы представлены интегрирующими звеньями с постоянными времени $T_{\delta\epsilon}$ и $T_{3.o.}$ и разделены интегрирующим звеном с постоянной времени $T_{\text{упр}}$. K_1 и K_2 – коэффициенты, описывающие

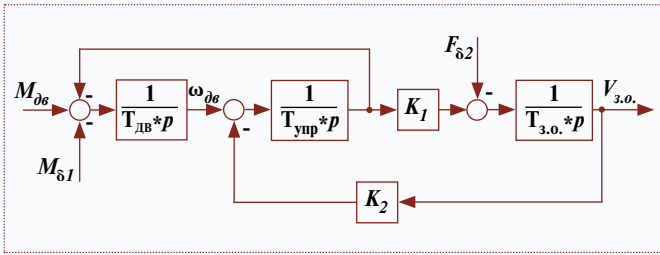


Рис. 3. Структурная схема арматуры с электроприводом

связь скоростей и сил взаимодействия между частями системы.

Диагностическими признаками в этой модели являются отклонения величин $d\omega_{\delta 2}/dt$ и $dV_{з.о.}/dt$ от «базовых» значений, соответствующих исправному электроприводу.

При нормальном срабатывании арматуры все элементы будут приводиться в движение линейно по отношению к крутящему моменту электродвигателя, за исключением случаев внезапно возникающих сил торможения или ускорения диагностируемых узлов.

Осуществить контроль параметров в размерностях сил и моментов на практике оказывается технически довольно сложно или затратно, поэтому наряду с данной диагностической моделью существует диагностическая модель, где в качестве основного диагностического параметра выступает активная мощность $P_{акм}$.

Электроэнергия, потребляемая электродвигателем из сети за определенный промежуток времени, равна интегралу $\Delta W = \int P_{акм}(t) dt$. Эта энергия расходуется на изменение кинетической энергии движущихся частей электропривода, на электродинамические потери в электродвигателе и на преодоление сил трения [5]. Выражение для преобразования энергии в электроприводе имеет вид:

$$\Delta W_{\Sigma} = \sum \Delta K_i + \sum \delta A_i + \delta W_{э} \quad (2)$$

где ΔK_i – изменение кинетической энергии каждого элемента электропривода, δA_i – потери энергии в каждом элементе из-за сил трения, $\delta W_{э}$ – электродинамические потери в электродвигателе.

В установившемся режиме электропривода

$$\sum \Delta K_i = 0, \sum \delta A_i \gg \delta W_{э}.$$

Во время переходных процессов, например, при «подрыве» запорного органа или пуске двигателя, величины $\sum \Delta K_i$ и $\delta W_{э}$ становятся сравнимы с величиной $\sum \delta A_i$. Для каждого характерного участка работы электропривода можно установить определенные отношения между величинами $\sum \Delta K_i$, $\sum \delta A_i$ и $\delta W_{э}$. При любом дефекте электропривода отношения между ними будут изменяться. Диагностические признаки в этой модели определяются отклонением отношений величин $\sum \Delta K_i$, $\sum \delta A_i$ и $\delta W_{э}$ от значений, соответствующих исправному электроприводу. Особое значение для диагностики имеет величина $\sum \delta A_i$, так как ее изменение на различных этапах работы электропривода является диагностическим признаком дефектов, связанных с изменением сил трения. Например, контролируемая мощность рабочего хода может быть увеличена (что говорит об увеличении $\sum \delta A_i$) за счет возникновения

дополнительной силы трения, возникшей в результате изменения коэффициента трения или силы прижима трущихся поверхностей.

Данный метод удобен тем, что величина энергии ΔW численно равна площади под кривой на графике активной мощности $P_{акм}$. Поэтому, в качестве диагностических признаков выступают изменения отношений между величинами $P_{акм}$, соответствующими различным участкам работы электропривода.

Для локализации дефектов в модель (1) необходимо внести движущиеся элементы, совершающие поступательное или вращательное движение. Согласно кинематической схеме, таких элементов у нас будет i от 1 до 14, в соответствии с количеством узлов, включаемых в систему уравнений для схемы, указанной на рис. 1.

При решении задачи автоматического определения $d\omega_i/dt$ и dV_i/dt , на кривой в интервале t от 0 до T , где T – полное время хода, в специализированном программном обеспечении, мы сводим задачу обнаружения диагностических признаков к определению матрицы

$$\begin{bmatrix} d\omega_1/dt & dV_1/dt \\ \dots & \dots \\ d\omega_n/dt & dV_n/dt \end{bmatrix} \quad (3)$$

где n – количество диагностических признаков.

Автоматическое определение матрицы (3), путем выделения коэффициентов из исходного сигнала активной мощности за счет пересчета параметров кинематической модели и отбрасывания затрат на рассеивание энергии, является целью разработки специализированного программного обеспечения.

Полученные диагностические признаки связываются с дефектами при помощи матриц соответствия, которые определяются путем решения системы уравнений (1) для каждой особой точки, определяемой как неисправность, или статистическим методом при анализе предварительно накопленных данных.

Программное обеспечение

Контролируя тысячи единиц оборудования на объекте, первым делом, возникает задача оптимизации затрат на обработку информации. Простой пример показывает, что сопоставление двух таблиц в отчете, выполненном в виде твердой копии и содержащем более 200 стр. данных, займет на практике не менее получаса, и если идет речь о постоянном контроле – возникает необходимость автоматизации рутинных процедур.

Первоначальные задачи записи и хранения информации можно решить при помощи автоматизированной базы данных, содержащей данные об объектах контроля, измерения, результаты анализа – автоматически связанных с технологической позицией.

Пример организации данных при помощи специализированного программного обеспечения диагностики арматуры (ПО) EVA v3.1, работающего в операционной среде Microsoft Window's под управлением СУБД Microsoft SQL-Server 2005, показан на рис. 4.

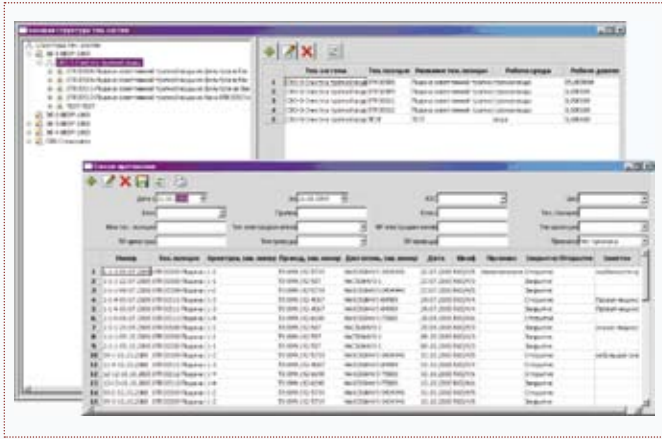


Рис. 4. Примеры окон перечня измерений и списка протоколов специализированного ПО EVA 3.1

ПО позволяет импортировать и сохранять данные со встраиваемых накопителей (типа «НЭП-256»), переносных сборщиков данных (типа «Крона-517») и стационарных систем диагностики, формирующих информационные файлы в формате «НЭП». Обработать сигналы активной мощности в автоматизированном режиме на основании сформированного шаблона и сравнивать параметры с допустимыми значениями, а также сохранять результаты в виде протокола со значениями параметров сигнала (рис. 5).

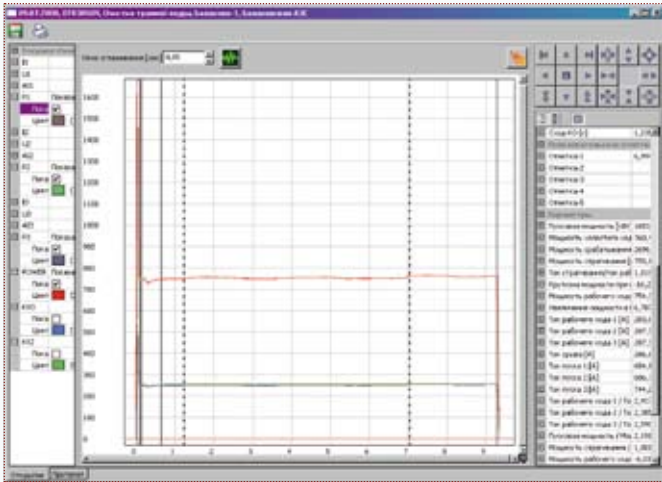


Рис. 5. Окно анализа сигналов ПО EVA 3.1

Диагностические параметры

Рассматривая переходные процессы активной мощности при срабатывании арматуры в размерности крутящего момента, мы обнаружим, что вид сигнатур активной мощности и крутящего момента совпадает. Это обусловлено линейной зависимостью между мощностью и крутящим моментом арматуры, закладываемой в программы расчета.

Согласно уравнению (2), все слагаемые могут рассматриваться как величины, отнесенные к нормирующим значениям, и при рассмотрении относительных диагностических параметров, таких как отношения:

- мощности «подрыва» рабочего органа к мощности рабочего хода ($P_{подр}/P_{хода}$);
- работы «до подрыва» к общей работе совершаемой за цикл ($A_{подр}/A_{общ}$);

- мощности «затяжки» к мощности рабочего хода ($P_{затяг}/P_{хода}$);
- пускового тока электродвигателя к току на рабочем ходе ($I_{пуск}/I_{хода}$);
- пускового тока электродвигателя к номинальному току ($I_{подр}/I_{ном}$);
- отношения времени рабочего хода к полному времени срабатывания ($T_{хода}/T_{сраб}$);
- отношения времени «подрыва» к времени рабочего хода ($T_{подр}/T_{хода}$).

Мы исключаем из рассмотрения размерность величин, что позволяет отказаться от пересчета активной мощности в крутящий момент и не проводить дорогостоящую процедуру определения переходных коэффициентов мощности и момента.

Зачастую мощность рабочего хода связана с изменением силы трения, возникшей за счет изменения коэффициента трения, или силы прижима трущихся поверхностей, что можно отметить на соответствующем участке циклограммы и выразить в относительных единицах.

Диаграмма работы концевых выключателей

Для обнаружения дефектов, связанных с повреждением или износом концевых выключателей, и выявления дефектов в схемах управления, совместно с диаграммой потребления мощности, анализируются сигналы работы концевых выключателей (рис. 6).

Сигналы концевых выключателей могут регистрироваться в аналоговом и цифровом виде, что позволяет контролировать следующие параметры концевых выключателей:

- наличие срабатывания;
- соответствие срабатываний диаграмме, установленной ТУ;
- механический «дребезг» концевых выключателей;
- состояние контактных пар.

Поскольку сигналы от концевых выключателей используются для управления арматурой и непосредственно связаны с выполнением функции «открытия/закрытия», контроль их состояния очень важен для обеспечения безотказной работы арматуры.

Определение дефектов

В результате обобщения неисправностей арматуры, проведенного комиссией по ядерной безопасности и регулированию США (U.S. Nuclear Regulatory Commission –

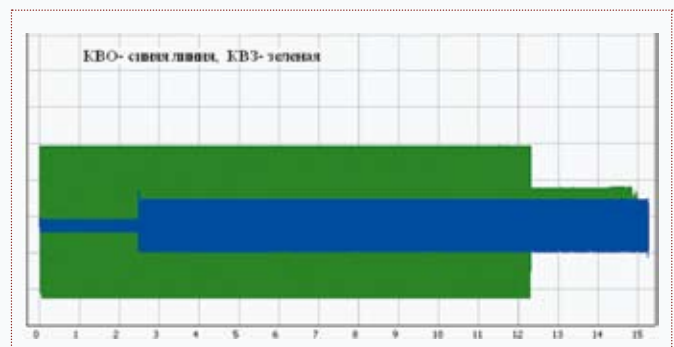


Рис. 6. Диаграмма концевых выключателей при «закрытии»

NRC), определен минимальный перечень характерных дефектов, описанных в письме №89/10 от 29 июня 1989 г. Данный документ содержит типовые неисправности арматуры с электроприводом, перевод данного письма представлен в *таблице 1*.

Путем анализа сигналов активной мощности и концевых выключателей возможно контролировать около 80% дефектов по *таблице 1*, исключая дефекты, не связанные с техническим состоянием оборудования.

Существует так же ряд неисправностей, связанных с конкретными конструктивными особенностями арматуры и привода. Например, на *рис. 7* показан участок графика активной мощности, соответствующий процессу «подрыва» двухдискового запорного органа задвижки DN 200. На графике видны процессы пуска двигателя и «нагрузки» штока арматуры при «страгивании» вначале одного, потом другого диска. Процесс обусловлен небольшим люфтом в узле крепления запорного органа. Контролируя развитие люфта во времени, можно определить момент перехода арматуры в неисправное состояние, отметив его как нелинейный рост принятого диагностического параметра, например, – разница во времени «страгивания» дисков.

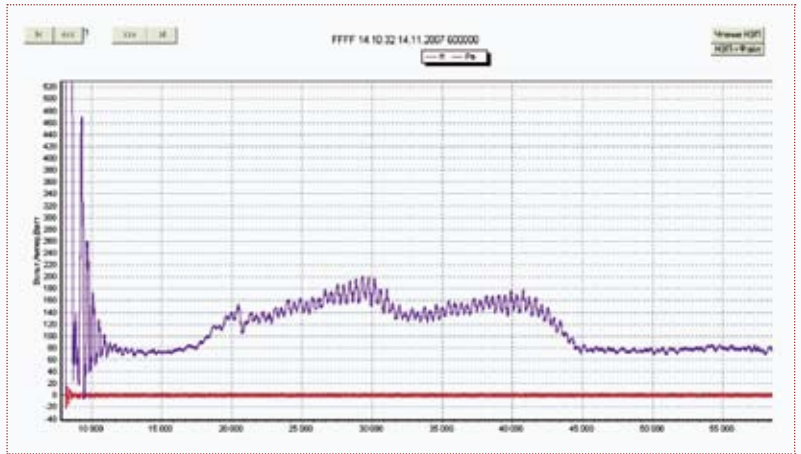


Рис. 7. Процесс «подрыва» двухдискового запорного органа

При анализе сигналов такой арматуры в ПО вводятся не типовые, а «пользовательские» точки контроля.

Резюме

Взаимосвязь электрических и механических параметров арматуры показывает, что для определения неисправностей арматуры и локализации дефектов достаточно контролировать активную мощность электропривода.

Для достоверной оценки технического состояния и определения дефектов внутрикорпусных деталей арматуры необходимо контролировать мощность и использовать параметры кинематической схемы для локализации дефектов путем определения механических величин узлов данной арматуры и электропривода.

Для выделения характерных неисправностей арматуры возможно применение диагностической модели на основе обобщенной кинематической схемы, позволяющей определять характерные неисправности для арматуры данного типа.

При вводе относительных диагностических параметров нет необходимости непосредственного измерения сил и моментов в размерном виде, что позволяет использовать активную мощность в качестве определяющего параметра, автоматизировать процесс обработки диагностической информации и оптимизировать технические средства контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменков А.К., Поваров В.П., Шаранов С.В. Диагностика электроприводной арматуры с использованием комплекта ПКСД-01 // Изв. вузов Сев.- Кавк. регион., Технические науки, 2006, Приложение №16, с. 71-76.
2. Матвеев А.В., Головлев В.В., Рязанова М.Г., Ярышев А.Б., Адаменков А.К., Иванов С.М., Опыт разработки стационарных систем диагностики арматуры // Арматуростроение 1 (58) 2009, с. 77-80.
3. Адаменков А.К., Веселова И.Н., Рясный С.И. Метод оценки герметичности трубопроводной арматуры тепловых и атомных станций // Тяжелое машиностроение, 2008, №6, с. 2-3.
4. Гуревич Д.Ф., Трубопроводная арматура // М.: «Машиностроение», 1981.
5. Герасимов В.Г., Электромагнитные устройства и электрические машины // М.: «Энергоатомиздат», 1997.

1.	Ошибочная настройка шунта моментной муфты;
2.	Ошибочная настройка выключателей моментной муфты;
3.	Дисбаланс выключателя моментной муфты;
4.	Зазор в пакете пружин или ошибочный предварительный натяг пакета пружин муфты ограничения крутящего момента;
5.	Недостаточная плотность сальниковой набивки шпинделя;
6.	Избыточная инерционность механических передач;
7.	Недостаточная или чрезмерная затяжка контргайки гайки штока;
8.	Ошибочная настройка конечного выключателя;
9.	Износ штока (в резьбовой части);
10.	Искривление или обрыв штока;
11.	Износ или разрушение зубчатой передачи;
12.	Проблемы со смазкой (затвердевание, миграция в пружинный пакет, недостаток смазки, излишек смазки, загрязнение, смазка, не установленная ТУ);
13.	Пробой изоляции двигателя или обрыв вала ротора;
14.	Ошибочное сечение провода или дефект провода;
15.	Заедание диска/седла (включая термическое заедание);
16.	Вода во внутренних элементах, или повреждения с этим связанные;
17.	Двигатель с недостаточными параметрами (меньшим электрическим напряжением или другими параметрами);
18.	Ошибочная индикация положения арматуры;
19.	Ошибочная настройка или дефект механизма расцепления штурвала;
20.	Проблемы с реле (неподходящее реле, грязь в реле, неисправное реле, неправильно подключенное реле);
21.	Ошибочная настройка переключателя тепловой перегрузки;
22.	Износ или разрушение подшипников;
23.	Разрушение или трещина элементов концевого выключателя или моментной муфты;
24.	Отсутствие или деформация ограничительной пластинки моментной муфты;
25.	Недостаточная мощность привода;
26.	Гидравлическое залипание золотника;
27.	Неподходящие металлы для шестерен, шпонок, болтов, штоков и т. д.;
28.	Падение напряжения (в пределах расчетного);
29.	Ошибка логики управления электродвигателя;
30.	Избыточное усилие на седло или в обратном направлении;
31.	Ошибочная сборка или настройка после ремонта и/или проверки;
32.	Не оформленная документально модернизация или настройка;
33.	Заедание моментной муфты или концевого выключателя.

Таблица 1. Список неисправностей арматуры с электроприводом