

электрических перемежающихся дуг с токами замыкания более 10 А маловероятно.

4. Обнаружено, что в воздухе, как и при давлении остаточного газа менее 10^{-3} Па, происходит срез

тока, который возникает при подходе тока к нулевому значению. Срез тока вызывает перенапряжение, способствующее повторному пробою и горению электрической дуги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черногубовский З.П. Заземление нейтрали электрических систем высокого напряжения. – Л.: Кубуч, 1934. – 202 с.
2. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы замыкания нейтрали в электрических системах: – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118 с.
3. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах / Пер. с англ. под ред. В.С. Комелькова. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 564 с.
4. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 275 с.
5. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
6. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. – 1957. – № 5. – С. 12–14.
7. Азаркевич Е.И., Котов Ю.А. Шунт из композиционных резисторов // Приборы и техника эксперимента. – 1976. – № 6. – С. 119–120.
8. Вакуумные дуги. Теория и приложение / Пер. с англ. под ред. В.С. Лафферти. – М.: Мир, 1982. – 362 с.

Поступила 14.10.2009 г.

УДК 621.34+661.879

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА ЗАГРУЗКИ ПЛАМЕННОГО РЕАКТОРА

С.В. Бойко, С.Н. Кладиев

Северская государственная технологическая академия, г. Северск

E-mail: kladiev@ssti.ru

Проведен расчет безотказной работы шнека загрузки пламенного реактора в составе технологического оборудования фторирования урана. На базе частотного преобразователя с повышенной надежностью модернизирован электропривод шнека загрузки. Предложена схема технологического контроля и управления пламенным реактором от АСУ ТП. Предусмотрена возможность дистанционного задания регулируемой частоты вращения электропривода шнека, реверса, вывода числовой и графической информации параметров системы управления на ПЭВМ оператора.

Ключевые слова:

Переработка оксидов урана, фторирование урана, пламенный реактор, шнек загрузки, мотор-редуктор, частотно-регулируемый электропривод, надежность электротехнического оборудования.

Key words:

Uranium oxide processing, uranium fluorination, flame reactor, load screw, motor reducer, variable-frequency electric drive, electro technical equipment reliability.

Введение

Одним из основных путей утилизации высокообогащенного урана является использование его в качестве топлива в энергетических ядерных реакторах для производства тепловой и электрической энергии. Большинство энергетических ядерных реакторов используют низкообогащенный уран.

Постановка задачи

С целью повышения функциональной надежности пламенного реактора, основного аппарата в технологическом процессе фторирования оксидов урана, необходимо одновременно контролировать

частоту вращения шнека загрузки и момент нагрузки на его валу. Только наличие момента нагрузки на валу шнека при косвенном дозировании по его оборотам может гарантировать подачу порошка оксидов урана в пламенный реактор для последующего фторирования. Данная задача должна быть решена при помощи современного частотно-регулируемого электропривода, интегрированного в существующую АСУ ТП.

Расчет надежности технологического оборудования

В атомной промышленности на первый план выходят принципы безопасности ядерного производства и ядерных технологий, надежности техно-

логического промышленного оборудования, а также обеспечение безопасности протекания и строгого выполнения технологического процесса.

В работе приведен расчет безотказной работы шнека загрузки пламенного реактора в составе технологической установки фторирования урана, рис. 1. При этом использованы следующие термины.

Отказом технологической схемы считаем неспособность схемы нести заданную нагрузку по продукту. За отказ элемента технологической схемы принимаем дефект оборудования. По тяжести последствий дефекты оборудования можно разделить на 3 степени:

- дефект, устраняемый на ходу (без остановки оборудования);
- дефект, устраняемый при остановке оборудования, но не требующий немедленного останова;
- дефект, требующий немедленного останова оборудования.

Горячий резерв — это элемент технологической схемы, включаемый в работу автоматически. Ограниченный резерв — отремонтированный элемент технологической схемы, находящийся в холодном резерве. Холодный резерв — это элемент технологической схемы, включаемый в работу не автоматически, а с участием персонала.

При работе в нормальных условиях, когда все элементы работают в штатном режиме, технологическая линия должна обеспечивать заданную производительность по продукту требуемого качества (не имеется ни одного из трех типов дефектов, либо имеется дефект 1 степени).

При работе в предаварийном режиме (какой-либо элемент имеет дефект 2 степени и нуждается в ремонте) возможны некоторые отклонения в технологическом процессе (ухудшение качества продукта, снижение производительности), при этом также возможна остановка линии в случае усугубления дефекта.

Ежемесячно оборудование производства фторирования оксидов урана выводится в плановый ремонт для проведения ревизии и устранения дефектов 2 степени.

Основным статистическим материалом для определения количественных характеристик надёжности элементов технологической схемы являются журналы дефектов оборудования, в которых фиксируются дефекты элементов технологической схемы производства гексафторида урана всех степеней.

На основании этих данных определяются [1]:

а) параметры потока отказов ω_i , 1/ч:

$$\omega_i = \frac{n_i}{N \cdot T_{pi}}, \quad (1)$$

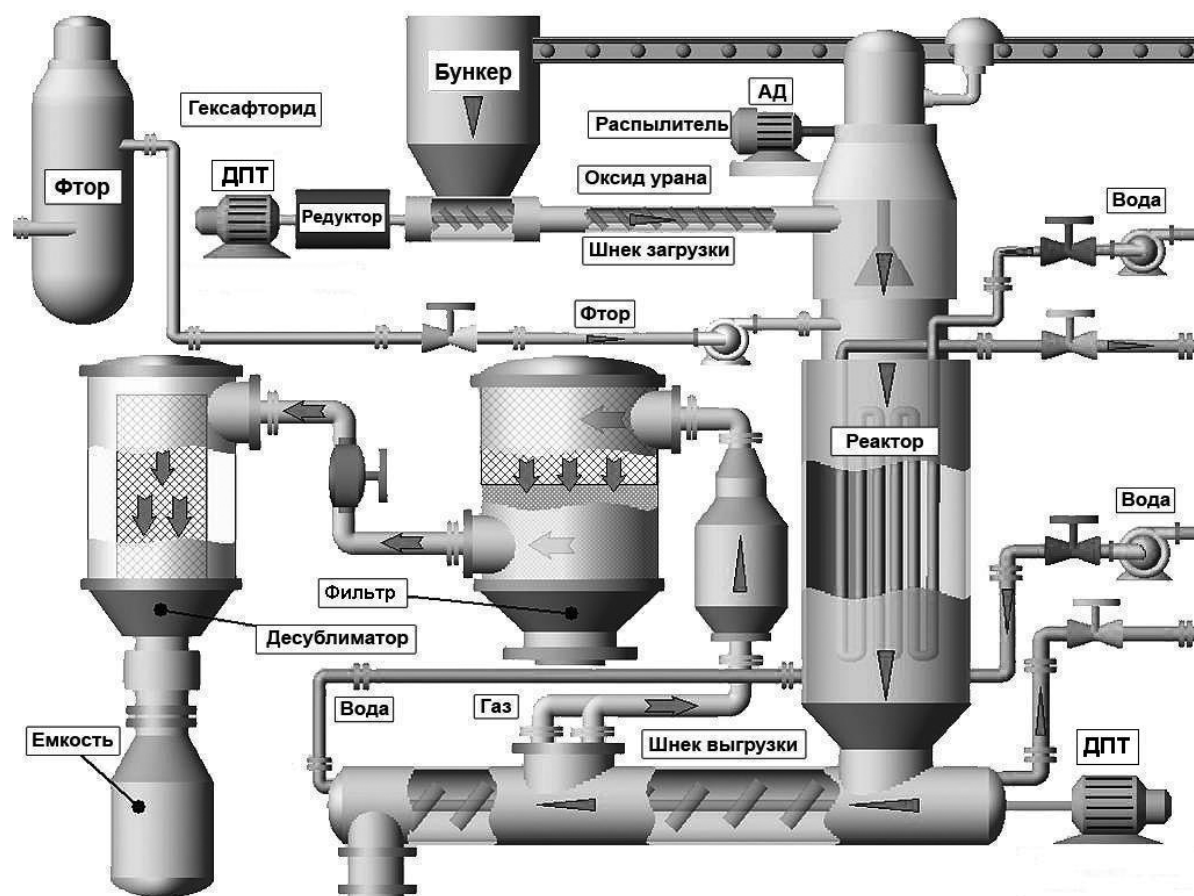


Рис. 1. Технологическая схема процесса фторирования урана. ДПТ — двигатель постоянного тока; АД — асинхронный двигатель

где n_i – количество дефектов N -го элемента за время его работы T_{pi} ;

- б) вероятности безотказной работы P_i за расчётный период при условии появления очередного события (отказа), подчиняющегося экспоненциальному закону распределения. В частности, этому распределению подчиняется величина промежутка времени между двумя смежными событиями простейшего потока [2]:

$$P_i = e^{-\omega_i \cdot t_i}, \quad (2)$$

где t_i – расчётный период времени, ч.

За расчётный период возьмем время непрерывной работы между плановыми остановами.

Для элементов технологической схемы имеющих горячий резерв вероятность безотказной работы за расчётный период будет рассчитываться по формуле:

$$P_i = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2), \quad (3)$$

где P_1, P_2 – вероятности безотказной работы за расчётный период первого и второго элемента схемы, рассчитываемые по формуле (2).

Вероятность отказа элемента рассчитывается по формуле:

$$Q_i = 1 - P_i. \quad (4)$$

На основании анализа аппаратно-технологических схем процесса фторирования урана составляем технологическую схему работы пламенных реакторов, а по ней – структурную схему надежности этих участков, рис. 2.

Последовательность элементов в схеме производная, т. к. вероятность безотказной работы системы не зависит от места расположения элемента в ней.

Затем определяем количественные характеристики надёжности элементов технологической схемы по формулам (1–3) на основании исходного статистического материала.

Для расчета вероятности безотказной работы всей линии производства фторирования оксидов урана необходимо рассчитать суммарную надежность оборудования процесса фторирования урана, которая будет равна произведению вероятности безотказной работы за расчётный период элементов технологической схемы (4) по каждому участку. При расчете суммарной надежности учитывается только вероятность появления дефектов 3 степени, т. к. остальные дефекты не ведут к остановке основного оборудования.

Суммарная надежность процесса фторирования урана будет равна произведению вероятности безотказной работы за расчётный период узла шнека загрузки, пламенного реактора и узла шнека выгрузки:

$$P_{\Sigma} = P_3 \cdot P_P \cdot P_B \cdot P_O,$$

где P_3, P_P, P_B, P_O – вероятности безотказной работы за расчётный период узла шнека загрузки, пламенного реактора, узла шнека выгрузки, системы охлаждения.

При наличии двух параллельных линий фторирования урана они могут резервировать друг друга. При остановке одной из линий в течение нескольких часов можно запустить другую, если она в рабочем состоянии.

Суммарная надежность первой и второй линии фторирования урана при имеющемся горячем резерве рассчитывается по формуле:

$$P_{\phi 2} = 1 - (1 - P_{\phi 1}) \cdot (1 - P_{\phi 2}),$$

где $P_{\phi 1}, P_{\phi 2}$ – вероятности безотказной работы за расчётный период первой и второй линиями фторирования урана, рассчитываемые по формуле (2).

Суммарная надежность всех трех линий фторирования урана при работе без горячего резерва будет равна произведению вероятности безотказной работы за расчётный период каждой из этих линий:

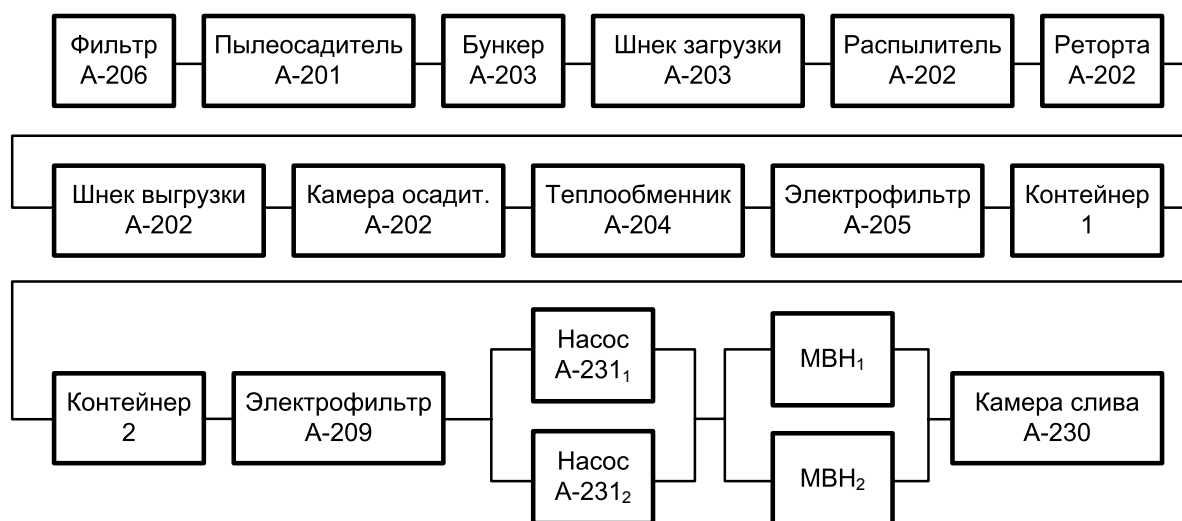


Рис. 2. Структурная схема надежности процесса фторирования урана. МВН – многоходовой водонагреватель

$$P_{\Sigma} = P_{Л1} \cdot P_{Л2} \cdot P_{Л3},$$

где $P_{Л3}$ — вероятности безотказной работы за расчётный период третьей линии фторирования урана.

Вероятность безотказной работы без единого дефекта линии фторирования урана за расчётный период времени составила 0,0072. Вероятность появления дефекта 1 степени, устраняемого на ходу — 0,526. Вероятность появления дефекта 2 степени, устраняемого в текущий ремонт — 0,747. Вероятность аварийной остановки — 0,64.

Средняя вероятность безотказной работы технологического оборудования фторирования урана за расчётный период составляет 0,38, в то время как общепринятая вероятность безотказной работы оборудования химических производств должна быть более 0,5 (параметр потока отказов $\omega < 9 \cdot 10^4$ 1/ч).

Но даже при наличии по одному резерву на технологической линии вероятность безостановочной работы процесса фторирования урана остается низкой из-за низкой надежности элементов технологической схемы, в том числе и шнека загрузки пламенного реактора.

Модернизация электропривода шнека загрузки

Привод постоянного тока шнека загрузки состоит из двигателя постоянного тока МИ-42Т, который связан со шнеком загрузки через двухступенчатый цилиндрический редуктор с коэффициентом передачи 1:10, карданного вала, блока управления и тиристорного преобразователя ПТО-2М. Регулирование частоты вращения двигателя осуществляется изменением напряжения на его якоре от преобразователя.

Каналы измерения технологических параметров обеспечивают измерение параметров процесса, осуществляют нормализацию сигналов и их передачу в блок управления тиристорным преобразователем (ПТО-2М).

Контроллер МФК на основе данных текущих параметров процесса вычисляет по заданной программе управляющее воздействие. Управляющие сигналы передаются в блок управления электропривода. Частота вращения шнека загрузки измеряется с помощью тахогенератора ТД-101, встроенного в двигатель постоянного тока МИ-42Т, сигнал с которого после нормализации поступает в контроллер МФК.

Анализ работы шнека загрузки с приводом постоянного тока пламенного реактора выявил следующие недостатки:

- система автоматического регулирования скорости шнека морально и физически устарела;
- для стабилизации механических характеристик мощность двигателя завышена в 2...2,5 раза;
- конструкция и схемотехнические решения вентильного преобразователя (ПТО-2М) морально и физически устарели, он имеет недостаточные

защитные функции, низкую надежность и невысокие эксплуатационные характеристики;

- существующая конструкция механической части электропривода, обеспечивающая передачу крутящего момента через редуктор, кардан или шарнир Гука, значительно усложняет конструкцию, увеличивает габаритные размеры и массу привода и имеет высокие уровни шума и вибрации.

Поэтому была разработана новая механическая система шнека загрузки с мотор-редуктором на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 1,5 кВт, управляемого от преобразователя частоты фирмы «Danfoss» марки FC 302. На рис. 3 представлен модернизированный электропривод шнека загрузки.

В данном преобразователе имеется возможность регулировать частоту вращения двигателя и измерять развиваемый момент электроприводом, поэтому стабильность работы шнека загрузки повышает надежность и эффективность технологического процесса. Контроль нагрузки электропривода шнека при помощи системы анализа состава отходящих газов на газоанализаторе установленного в «хвосте» процесса, позволяет прогнозировать возможность исключения «проскока» фтора, т. е. снизить вероятность аварийной ситуации, когда загружаемое вещество отсутствует в реакционной зоне пламенного реактора, а фтор разрушает изнутри конструктивные элементы аппарата за счет коррозии.

Привод выполнен на основе мотор-редуктора с асинхронным двигателем и частотного преобразователя FC302. Вместо карданной передачи применяется фланцевое крепление мотор-редуктора к корпусу шнека. Для защиты двигателя от тепловых перегрузок используется тепловое реле и термисторная защита. Работа электропривода обеспечивается в ручном и автоматическом режимах. В автоматическом режиме управление осуществляется от внешней системы автоматизированного управления по сигналам «готовность привода», «включение привода», «задание частоты вращения привода», «контроль скорости привода», «реверс привода» и «контроль нагрузки привода».

В ручном режиме управление осуществляется кнопками «включение», «выключение», «задание скорости» и «контроль скорости и нагрузки», расположенными на передней панели шкафа управления.

В рабочем режиме электропривода используется регулирование частоты вращения шнека загрузки в пределах 16...160 об/мин.

Преимущества применения мотор-редуктора:

- увеличение срока службы механического оборудования за счет меньшего количества подвижных частей;
- высокий класс защиты IP65, позволяющий работать механическому оборудованию в присутствии агрессивной среды;

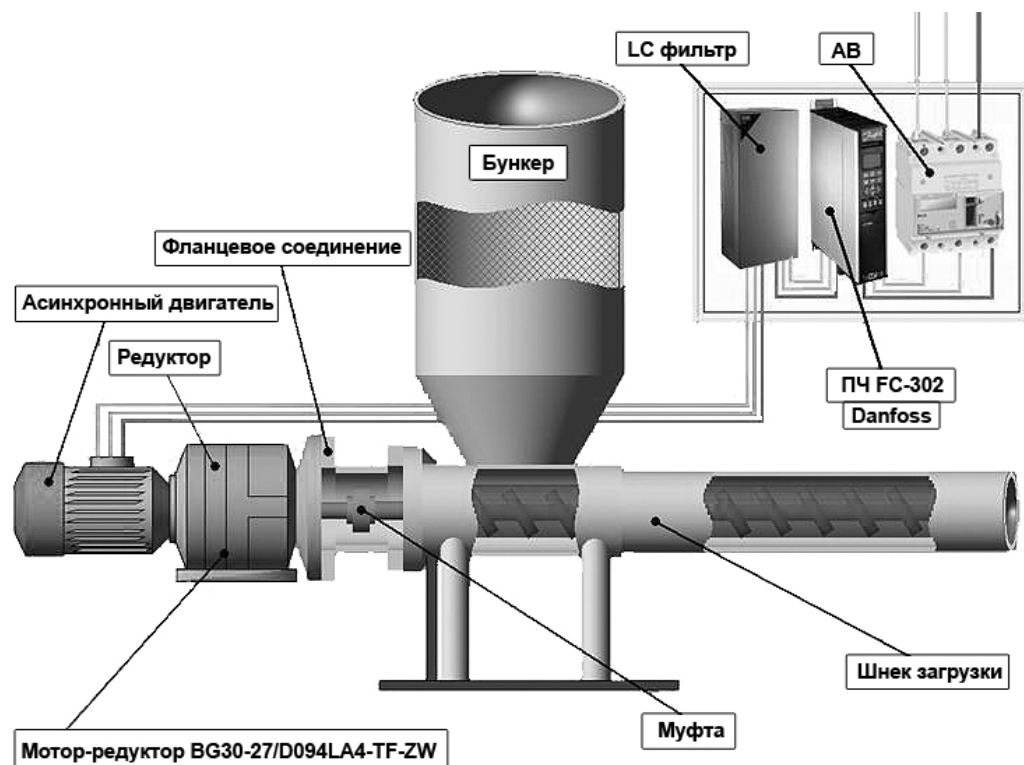


Рис. 3. Шнек загрузки с асинхронным приводом. АВ – автоматический выключатель. ПЧ – преобразователь частоты

- сокращение эксплуатационных расходов за счет повышения общего коэффициента полезного действия; снижение энергопотребления (преобразователь имеет функцию обеспечения энергосберегающего режима работы), а также снижение затрат на техническое обслуживание.

Недостаток – сравнительно высокая стоимость.

Схема преобразователя частоты для управления мотор-редуктором состоит из DSP-процессора, выпрямителя, инвертора. Напряжение сети стандартной частоты подаётся на вход неуправляемого выпрямителя, преобразующего переменное напряжение в постоянное, которое в свою очередь подаётся на вход инвертора, который преобразует его в трёхфазное напряжение регулируемой частоты, поступающее на двигатель. Векторное управление преобразователем частоты [3] дает возможность определения состояния электрической машины по измеренным фазным токам и напряжениям, что ведет к повышению надёжности системы; ведется постоянный контроль векторов напряжения и тока для обеспечения максимального выходного крутящего момента. Оно позволяет с высокой точностью в большом диапазоне регулировать скорость двигателя, динамично изменять момент на валу двигателя.

Экспериментальные исследования электропривода в рабочих условиях

В результате испытаний было установлено, что привод обеспечивает работу с номинальной нагрузкой до 87 Н·м, но для надежной работы системы имеющегося запаса по моменту недостаточно.

Для преодоления кратковременных бросков момента нагрузки электропривод шнека требует, в соответствии с графиком скорости и тока нагрузки (данные АСУ ТП), большего запаса по моменту. На рис. 4 показан график, где имеются выбросы тока, соответствующие моменту 80...120 Н·м.

Не имея необходимого запаса по моменту, двигатель может останавливаться при срабатывании защит, что снижает надежность всей системы. Кроме того, в рабочих режимах частота вращения шнека загрузки более 120 об/мин не использовалась.

Для перерабатываемых продуктов с более высокой вязкостью предложено использовать более надежный конический мотор-редуктор ВК20 с электроприводом мощностью 2,2 кВт, позволяющий развивать момент на валу до 160 Н·м. Для обеспечения надежной работы на малых частотах вращения мотор-редуктор оснащается устройством независимой вентиляции.

Использование асинхронного привода и реализация современных методов управления дает возможность получать высокие показатели надежности и безопасности, снижение затрат на эксплуатацию в течение всего срока службы. Векторное управление обеспечивает широкий диапазон регулирования, наилучшую динамику системы, обеспечение максимального выходного крутящего момента. Достигается высокая экономическая эффективность от внедрения системы преобразователя частоты – асинхронный двигатель за счет экономии электроэнергии, снижения затрат на техническое обслуживание и сокращения эксплуатационных расходов.

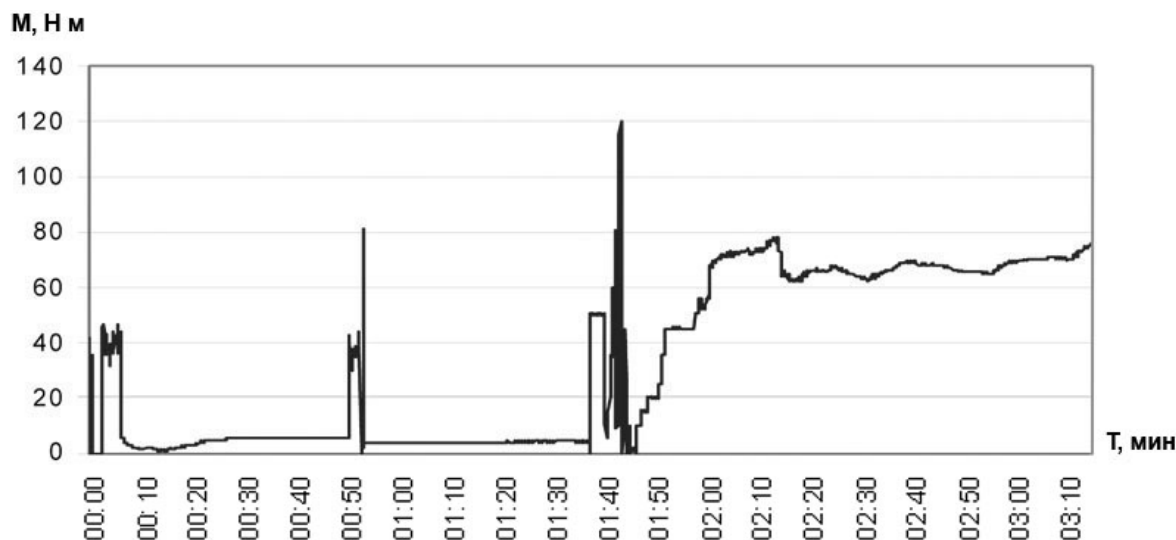


Рис. 4. Диаграмма изменения момента асинхронного привода

Заключение

1. Проведена модернизация электропривода шнека загрузки с новой более надежной механической передачей. Разработана новая конструкция механической части узла сочленения шнека с мотор-редуктором асинхронного электропривода, обеспечивающего передачу крутящего момента к шнеку без использования карданного вала и отдельного редуктора. Это упростило конструкцию механической части, уменьшило габаритные размеры привода и, как следствие, повысило надежность, энергоэффективность, эксплуатационные характеристики, уменьшило затраты и время на обслуживание системы управления технологическим процессом.
2. Реализована схема технологического контроля и управления узлом загрузки пламенного реак-

тора от АСУ ТП на базе контроллера МФК, где реализованы:

- дистанционное включение, отключение, задание управляющих воздействий от управляющей ПЭВМ оператора, а также компенсация возмущений;
 - вывод числовой и графической информации параметров системы управления на ПЭВМ оператора.
3. Выполнен расчет безотказной работы шнека загрузки пламенного реактора в составе технологического оборудования фторирования урана. Показано, что шнек загрузки является слабым звеном в технологической цепочке фторирования урана, в том числе и из-за использования в нем морально устаревшего привода постоянного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчёту надёжности. — М.: Советское радио, 1975. — 471 с.
2. Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н., Коровина И.А. Справочник по вероятностным расчётам. — М.: Воениздат, 1970. — 536 с.
3. Электротехника. — В 3-х кн. Кн. III. Электроприводы. Электроснабжение / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестакова. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. — 639 с.

Поступила 21.05.2009 г.