

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СОВМЕСТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ МЕХАНИЗМОВ МАШИНЫ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Одним из жизненно важных для станции рабочих этапов является загрузка ядерного топлива в активную зону реактора, выгрузка и замена отработавшего топлива с контролем герметичности оболочки тепловыделяющих сборок (ТВС). Эти операции осуществляются специализированными машинами перегрузочными (МП). Машина перегрузочная состоит из трёх основных элементов:

- перемещающегося над зоной обслуживания по рельсовому пути моста;
- перемещающейся по рельсам моста тележки;
- укреплённой на тележке телескопической трёхсекционной рабочей штанги (РШ).

РШ, в свою очередь, включает в себя механизмы перемещения захвата ТВС, перемещения захвата кластера, фиксатора захвата ТВС, служащего для его открытия и закрытия, а также механизма поворота РШ, служащего для открытия и закрытия пробок гермопеналов и пеналов системы обнаружения дефектных сборок (СОДС).

Процесс перегрузки контролируется специальной телевизионной системой (СТС), для чего МП снабжена механизмами вертикального перемещения телештанги и поворота площадки с телекамерой.

Механизмы машины перегрузочной управляются регулируемыми приводами, разработанными НПП ВНИИЭМ, обеспечивающими разгон и торможение двигателей механизма с постоянным безопасным ускорением. Исключение составляют двигатели поворотной площадки телекамеры и фиксатора, управляемые нерегулируемыми приводами (движение с постоянной скоростью). Регулируемые приводы позволяют выбрать одну из 16 фиксированных скоростей в диапазоне от нулевой до максимальной. Приводы могут осуществлять экстренное торможение при возникновении условий формирования защитных блокировок.

Значительным ресурсом повышения эффективности работы АЭС является сокращение времени проведения работ по перегрузке топлива, поэтому при разработке системы управления МП нового поколения (СУМП) была поставлена задача разработки алгоритма наведения рабочей штанги на заданную координату, минимизирующего время перемещения.

Технология перегрузки ядерного топлива, регламентируемая конструктором реактора и МП допускает совместное движение трёх механизмов: моста, тележки и поворота телекамеры. В этих условиях задача оптимального по быстродействию управления для МП выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}x'(t) &= Ax(t) + bu(t); \quad t \in (0, T), \quad T > 0; \\x(0) &= x_0; \quad x(T) = x_1; \quad x(t) \in G, \quad T \rightarrow \min,\end{aligned}$$

где A – действительная матрица 3×3 ; $x(\cdot)$, $b \in R^3$, G – область допустимых значений фазовых переменных.

Поскольку перемещение по каждой из трёх координат осуществляется с помощью механизмов, управляемых независимыми приводами, то, если не учитывать ограничения на состояние фазовых переменных, оптимальное по быстродействию управление будет состоять в разгоне до максимально допустимой скорости с последующим торможением и остановкой в конечной точке.

Таким образом, основной задачей оптимального управления в данном случае является разработка алгоритмов обхода препятствий по траектории, обеспечивающей наискорейшее перемещение МП в рабочей зоне заданной геометрии из текущего положения (X_b, Y_b, φ_t) в заданное (X_z, Y_z, φ_z) , (где X, Y, φ – координаты моста, тележки и угол поворота телекамеры соответственно).

Структурная схема алгоритма управления движением механизмами МП приведена на рис. 1.

При разработке алгоритма были учтены следующие ограничения, регламентируемые заданной технологией перегрузки топлива и особенностями конструкции МП:

- привод моста обеспечивает переход от текущей скорости к заданной, не превышающей значения V_{mmax} , с некоторым ускорением $a_m < A_m$, где A_m – предельно допустимое ускорение разгона (торможения) моста;
- привод тележки обеспечивает переход от текущей скорости к заданной, не превышающей значения V_{tmax} , с некоторым ускорением $a_t < A_t$ где A_t – предельно допустимое ускорение разгона (торможения) тележки;
- привод поворотной площадки телекамеры обеспечивает пово-

рот телекамеры с постоянной угловой скоростью V_{tv} в диапазоне $0 - 1,75 \pi$ рад;

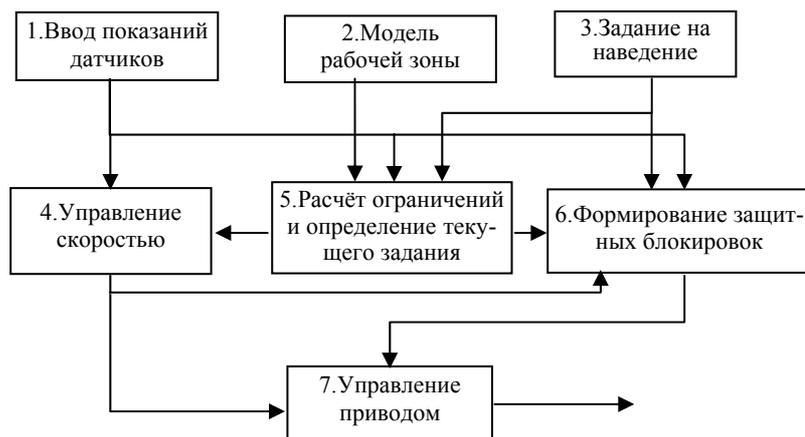


Рис 1. Структурная схема алгоритма управления движением механизмами МП

- подход к точке наведения должен осуществляться мостом и тележкой в течение некоторого времени с доводочной скоростью, не превышающей V_{md} и V_{td} на конечных участках длиной L_{mf} и L_{tf} соответственно;

- скорости V_{md} и V_{td} выбираются таким образом, чтобы разброс тормозного пути при движении на этих скоростях не превышал 1 мм;

- движение мостом и тележкой в зоне, отстоящей от препятствий не более, чем на 400 мм, может осуществляться с минимальной рабочей скоростью, не превышающей V_{mmin} и V_{tmin} ;

- движение рабочей штанги по транспортному коридору допускается при отклонении РШ не более Δ_k мм от оси коридора и положении ТВ-камеры "позади моста" (0 рад при движении в сторону АЗ или π рад при движении от АЗ со скоростью, не превышающей V_{kor});

- расстояние от центра рабочей штанги до любого препятствия не должно быть меньше Δ (при любых перемещениях);

- расстояние ТВ-камеры до любого препятствия не должно быть меньше $\Delta_{ТВ}$ (при любых перемещениях).

Ввод, преобразование и фильтрация показаний датчиков положения (энкодеров) механизмов МП с точностью до 0,1 мм, конечных выключателей, самодиагностики привода, датчиков усилий

на тросах, сейсмодатчиков и т.д. осуществляется устройствами связи с объектом (УСО) в блоке 1.

Модель рабочей зоны машины перегрузочной (блок 2) представляет собой совокупность геометрических фигур – прямоугольных параллелепипедов и цилиндров, которые могут являться "телами" или "пустотами".

Каждая такая фигура описывается в массиве-картограмме координатами крайних точек в трёхмерной системе координат, привязанных к показаниям датчиков положения моста, тележки и рабочей штанги машины перегрузочной.

Задание на наведение МП (блок 3) представляет собой вектор (X_z, Y_z, φ_z) , где X_z, Y_z, φ_z – координаты моста, тележки и угол поворота телекамеры соответственно. Задание поступает в управляющую схему контроллера по сети от верхнего уровня СУМП.

В блоке 6 рассчитывается **оптимальный маршрут движения МП**, представляющий собой ряд точек в рабочей зоне (x_1, x_2, \dots, x_n) , где $n \geq 1$, $x_n = (X_z, Y_z, \varphi_z)$ – заданное положение, $x_i = (X_i, Y_i, \varphi_i)$ – промежуточные точки, которые должны быть пройдены, исходя из технологических ограничений на движение. После расчёта маршрута определяется текущее задание на движение $x_0 = (X_0, Y_0, \varphi_0)$ и ограничение на скорость перемещения моста и тележки (V_{m0}, V_{t0}) , которые передаются в блок 4. Если на пути перемещения нет препятствий для движения, то $x_0 = x_n$, $V_{m0} = V_{mmax}$, $V_{t0} = V_{tmax}$.

В блоке 5 проверяются **условия формирования защитных блокировок**. Эти блокировки связаны с технологическими ограничениями на движение МП, и направлены на обеспечение безопасного проведения работ по перегрузке топлива. Условия формирования для "габаритных" защитных блокировок создаются, если текущее положение моста, тележки или ТВ-камеры находится в недопустимой близости от препятствий или границы зоны обслуживания. Сигнал наличия условий, вызывающих блокировку, передаётся в блок управления приводом, который в этом случае формирует команду экстренного торможения на все механизмы.

В блоке 4 (работающем по схеме П-регулятора, в основе которого лежит трёхпозиционное реле с гистерезисом), по рассогласованию между текущим положением $x_t = (X_t, Y_t, \varphi_t)$ и текущим заданием x_0 , определяется направление и скорость движения. **Текущее задание по скорости** выбирается из 16 допустимых скоростей (включая нулевую), обеспечиваемых приводом с учётом ограничений на ускорение торможения a_m, a_t и технологических ограничений блока 6 (V_{m0}, V_{t0}) .

Следует также отметить, что общее время наведения определяется механизмом, требующим наибольшего времени для достиже-

ния конечного состояния (как правило – это механизм поворота ТВ-камеры). Поэтому управление движением более "быстрых" механизмов должно быть направлено на обеспечение беспрепятственного перемещения самого "медленного" механизма, т.е. движение "быстрого" механизма может не быть оптимальным по быстродействию.

Блок 7 обеспечивает **формирование команды управления приводом** как на движение, так и на экстренный (по блокировке или команде оператора) или "мягкий" (по команде оператора или завершению движения) останов МП.

Формирование маршрута перемещения

При изменении конечного пункта задания на наведение выполняется формирование маршрута перемещения моста, тележки, ТВ-камеры.

Если текущая и конечная точки задания лежат в разных зонах, то в маршрут включаются точки входа и выхода из коридоров, движение по которым необходимо. Точка входа в коридор расположена по центру коридора (координата y) и на границе зоны входа в коридор (координата X). Точка выхода из коридора расположена по центру коридора (координата Y) и на расстоянии $R_{me} + \Delta_{me} + L_{mf}$ от границы зоны выхода из коридора (координата X). Здесь R_{me} – расстояние от центра рабочей штанги до крайней точки ТВ-камеры. Заданный угол положения ТВ-камеры для этих точек выбирается 0 рад при движении в сторону АЗ или π рад при движении от АЗ.

Если текущее положение РШ в коридоре и ТВ-камера ориентирована не должным образом (не "за мостом"), то сначала формируется точка выхода из коридора в зону в направлении, противоположном положению ТВ-камеры (по центру коридора (координата Y) и на расстоянии $R_{TB} + \Delta_{TB} + L_{mf}$ от границы зоны выхода из коридора (координата X)) и далее – точки входа и выхода из коридора с ориентацией ТВ-камеры "за мостом" в соответствии с заданным направлением движения.

Модификация маршрута перемещения рабочей штанги

Первый элемент массива маршрута перемещения рабочей штанги является текущим заданием на наведение моста и тележки и поворота рабочей штанги.

Если количество элементов в текущем маршруте перемещения рабочей штанги больше одного, то это означает, что выполняется один из трёх видов перемещений:

- движение в направлении входа в транспортный коридор;
- движение в направлении выхода из транспортного коридора;
- движение в точку поворота телекамеры в необходимое положение.

Модификация маршрута перемещения рабочей штанги (первый элемент маршрута удаляется и текущим заданием становится второй элемент маршрута) производится в следующих случаях:

- при движении в направлении входа в коридор мост выехал за пределы текущей зоны;
- тележка переместилась на ось коридора и ТВ-штанга приняла положение "за мостом";
- при движении в направлении выхода из коридора мост выехал за пределы точки выхода из коридора;
- производится движение в точку поворота телекамеры и рабочая штанга уже находится недалеко от точки разворота (на расстоянии меньше, чем L_{mf} и L_{gf} соответственно).

Расчёт ограничений на скорость перемещения моста и тележки

Постановка задачи прогноза времени движения и расчёта ограничений на скорость перемещения моста и тележки выглядит следующим образом: мост (тележка) движется со скоростью V_0 . Необходимо рассчитать ограничение на скорость V_g , при которой мост (тележка) остановится в конечной точке при ограничении на время движения по участку с постоянной скоростью V_g – не менее T_n с и ускорении разгона (торможения) a_m (рис. 2).

Пусть: V_0 - текущая скорость; L - путь до остановки; L_f - участок пути на минимальной скорости (финишный); a_m - ускорение разгона (торможения); V_{max} - максимальная скорость механизма; V_{min} - минимальная скорость механизма; T_n - минимальное время движения на постоянной скорости; T_d - прогноз по времени движения. При $L < (V_0^2 - V_{min}^2) / 2a_m$ – задача не имеет решения – тормозной путь (при ограничении на ускорение торможения) больше расстояния до точки наведения.

В качестве решения полагаем $V_g = 0$, $T_d = V_0/a_m$. В этом случае на привод будет выдан сигнал "экстренного" торможения. Ускорение экстренного торможения существенно выше a_m , однако возможна ситуация, когда и в этом случае тормозной путь будет больше расстояния до точки наведения, т.е. произойдёт "проезд" точки наведения и необходимо будет вырабатывать управление

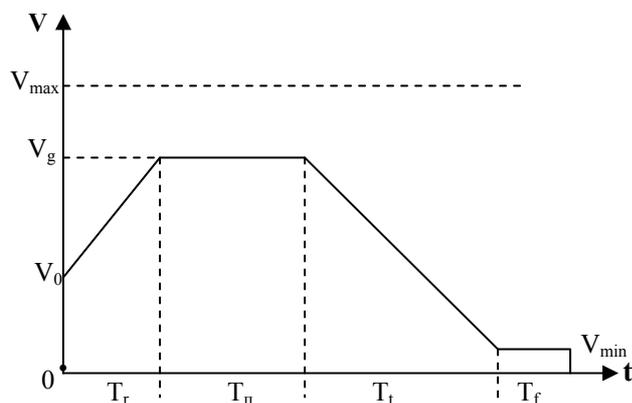


Рис.2. Расчёт ограничения на скорость и время движения до остановки

движения в обратном направлении для возврата в точку наведения. Следует отметить, что для возникновения такой ситуации в двухканальной системе управления необходимо, чтобы произошло больше одного отказа, что является непроектным случаем.

При $L - L_f < (V_0^2 - V_{min}^2) / 2a_m < L$ – задача не имеет решения – участок пути движения на минимальной скорости меньше L_f (при ограничении по ускорению торможения). В этом случае полагаем $V_g = V_{min}$ и $T_d = (L - (V_0^2 - V_{min}^2) / 2a_m) / V_{min} + (V_0 - V_{min}) / a_m$. (Качественное управление не достигается, однако возможно плавное торможение без необходимости возврата в точку наведения). Предположим $V_g \geq V_0$. Тогда мы имеем случай, представленный на рис. 2, который описывается уравнением:

$$V_g^2 + V_g a_m T_n - (V_0^2 + V_{min}^2) / 2 - a_m (L - L_k) = 0. \text{ Его решение:}$$

$$V_g = -0,5 a_m T_n + \sqrt{0,25 a_m^2 T_n^2 + (V_0^2 + V_{min}^2) / 2 + a_m (L - L_k)} \text{ и}$$

$$T_d = (2V_g - V_{min} - V_0) / a_m + T_n + L_f / V_{min}.$$

Если при решении получим $V_g > V_{max}$, то полагаем $V_g = V_{max}$ и прогноз времени движения

$$T_d = (2V_{max} - V_{min} - V_0) / a_m + L_f / V_{min} + (L - L_k - (2V_{max}^2 - V_0^2 - V_{min}^2) / 2a_m) / V_{max}.$$

Если при решении получим $V_g < V_0$, то тогда мы имеем случай, представленный на рис. 3, который описывается уравнением: $V_g T_n + (V_0^2 - V_{min}^2) / 2a_m = (L - L_k)$. Его решение:

$$V_g = (2a_m(L - L_k) + (V_{min}^2 - V_0^2)) / 2a_m T_n \text{ и } T_d = (V_0 - V_{min}) / a_m + L_f / V_{min} + T_n.$$

Отметим, что для реального объекта управления V_{min} и a_m , как правило, таковы, что составляющая $V_{min}^2/2a_m < 1\text{мм}$, т.е. меньше требуемой точности наведения.

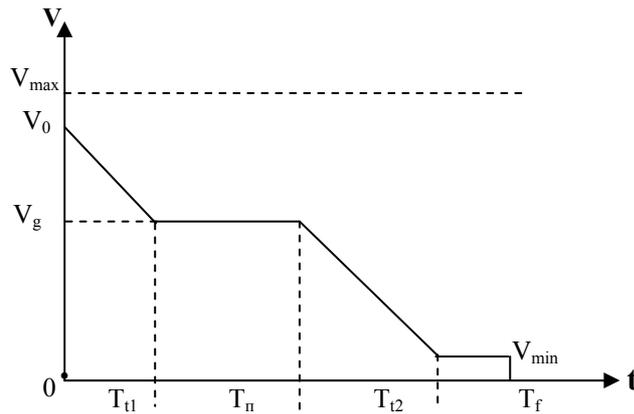


Рис.3. Расчёт ограничения на скорость и время

Используя этот факт, можно удалить соответствующие составляющие из формул, и сократить объём и время вычислений, что, в свою очередь, повысит точность наведения.

Расчёт дополнительных ограничений на скорость движения моста и тележки

Если в конечной точке маршрута невозможен поворот ТВ-камеры в заданное (расчётное для конечного пункта) положение и время поворота ТВ-камеры в заданное положение T_{mk} больше прогноза на время движения либо моста, либо тележки, то и для моста, и для тележки решается следующая задача.

Мост (тележка) движется со скоростью V_0 . Необходимо рассчитать ограничение на скорость V_g , при которой мост (тележка) остановится в конечной точке через время не меньшее, чем T_{mk} .

При $T_{mk} - T_k < V_0/a_m$ или $L - L_k < V_0^2/2a_m$ задача не имеет решения – времени или пространства не хватит даже на остановку (при ограничении по ускорению). В этом случае полагаем $V_g = 0$.

Иначе при $V_g > V_0$ (см. рис. 2) имеем исходное уравнение для определения V_g :

$(V_g^2 - V_0^2)/2a_m + V_g[T_{mk} - T_k - (V_g - V_{min})/a_m - (V_g - V_0)/a_m] + (V_g^2 - V_{min}^2)/2a_m = L - L_k$
или, опуская V_{min} , по соображениям изложенным выше, окончательное уравнение:

$V_g^2 - V_g (a_m (T_{mk} - T_k) + V_0) + V_0^2/2 + a_m (L - L_k) = 0$. Его решение:

Если при решении получим $V_g < V_0$ (см. рис. 3), то, опуская выкладки, V_g можно рассчитать по формуле:

$$V_g = (a_m (L - L_k) - V_0^2/2) / (a_m (T_{mk} - T_k) - V_0).$$

Расчёт ограничений на движение МП из одной зоны в другую

Если точка наведения расположена не в зоне нахождения рабочей штанги, то формируется маршрут движения МП между зонами (через транспортные коридоры).

Если первый элемент массива-маршрута - движение к входу в транспортный коридор, то производится контроль габаритных ограничений по алгоритму, приведённому в¹.

Далее осуществляется прогноз времени движения и расчёт ограничений на скорость перемещения моста и тележки и расчёт времени перемещения ТВ-камеры из текущего положения в положение "за мостом".

Если в текущей точке (или в точке входа в коридор) возможен поворот ТВ-камеры в положение "за мостом", то определяется время на подготовку к движению через коридор $T_k = \max(T_{td}, T_{mk})$, т.е. за время T_k должна развернуться в нужное положение ТВ-камера (время T_{mk}) и встать на ось коридора тележка (время T_{td}).

Далее решается следующая задача.

Мост движется со скоростью V_0 . Необходимо рассчитать ограничение на скорость V_g при которой мост окажется в конечной точке через время больше, чем T_k без ограничения на конечную скорость.

При $V_g > V_0$ (рис.4,а): если $V_0 < L/T_k - a_m T_k/2$ – решение $V_g = V_{max}$ (путь слишком велик при заданном ускорении).

$(V_g^2 - V_0^2) / 2a_m + V_g (T_k - (V_g - V_0)/a_m) = L$ или окончательное уравнение: $V_g^2 - 2V_g (a_m T_k + V_0) + V_0^2 + 2a_m L = 0$. Его решение:

$$V_g = (a_m T_k + V_0) - \sqrt{(a_m T_k + V_0)^2 - V_0^2 - 2a_m L}.$$

Если при решении получим $V_g < V_0$, то при $V_0 > L/T_k + a_m T_k/2$ – задача не имеет решения – начальная скорость слишком велика при ограничении по ускорению торможения (в этом случае полагаем $V_g = 0$), иначе исходное соотношение (рис. 4,б):

¹Е.М.Раскин, М.И.Федосеев. Модель рабочей зоны и расчет допустимых движений при одновременном перемещении механизмов в системе управления машиной перегруженной. См. наст. том.

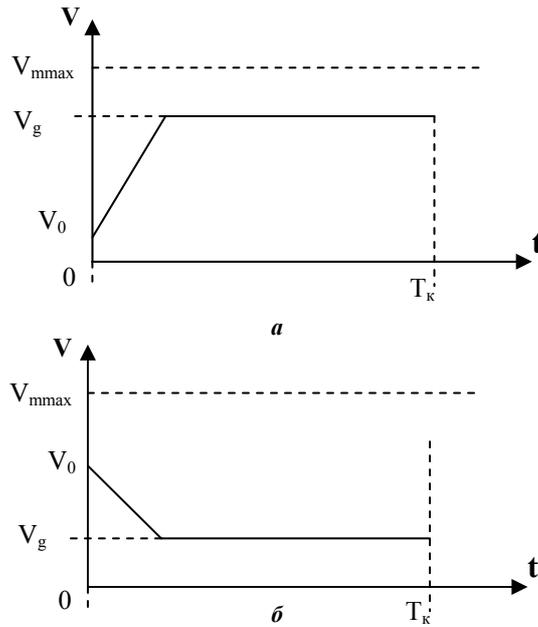


Рис.4. Расчёт ограничения на скорость движения моста при движении к транспортному коридору

$$(-V_g^2 + V_0^2) / 2a_m + V_g (T_k + (V_g - V_0) / a_m) = L$$

или окончательное уравнение:

$$V_g^2 + 2V_g (a_m T_k - V_0) + V_0^2 - 2a_m L = 0.$$

Его решение:

$$V_g = -(a_m T_k - V_0) + \sqrt{(a_m T_k - V_0)^2 - V_0^2 + 2a_m L}.$$

Данный алгоритм был реализован в системе управления машиной перегрузочной для 3-го блока Калининской АЭС, которая прошла межведомственные испытания и принята в промышленную эксплуатацию.