

Хвиюзов Михаил Андреевич

Галашев Александр Николаевич

МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА КРУГЛОПИЛЬНЫХ СТАНКОВ ДЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ РАСПИЛОВКИ ДРЕВЕСИНЫ

Ключевые слова: температурный контроль, нагрев, температурный перепад, процесс пиления, параметры объекта измерения, коэффициент теплового излучения, пирометрические датчики, круглые пилы, метод прогнозирования.

Исследователями данной работы для сохранения работоспособного состояния круглопильных станков предложено использовать пирометрические средства температурного контроля. Определены условия, порядок расчета и модель прогнозирования температурного перепада круглых дереворежущих пил в процессе пиления древесины.

Keywords: temperature control, heating, temperature differential, the process of sawing, the parameters of the measurement object, a coefficient of heat radiation of the pyrometric sensor, circular saw, method of forecasting.

In order to maintain a healthy state of circular sawing machines the author proposed to use pyrometric means of temperature control. The conditions, method of calculation and prediction model of the temperature drop of the round of wood cutting saws in the process of sawing wood have been determined.

Деятельность любого современного лесопильного или деревообрабатывающего предприятия практически невозможно организовать без использования круглопильных станков. По оценкам различных источников, доля данного типа оборудования составляет более половины от всего имеющегося парка деревообрабатывающих станков, что в свою очередь объясняется рядом преимуществ по сравнению с другим технологическим оборудованием этого же назначения. Производственников привлекают высокая производительность, удовлетворительное качество получаемой продукции и сравнительно невысокие затраты на установку и эксплуатацию.

Очевидным является и тот факт, что полноценной замены круглопильным станкам в обозримом будущем не предвидится, а требования и возможности современного производства обуславливают непрерывные проектно-исследовательские работы по разработке новых конструкций и совершенствованию систем управления эксплуатируемых в настоящее время станков.

Работоспособность режущего инструмента круглопильных станков непосредственно влияет на основные технико-экономические показатели производственного процесса, в связи, с чем требуется пристальное внимание по соблюдению конструктивных параметров дереворежущих пил и условий их применения.

В процессе пиления древесины режущий инструмент подвергается негативному воздействию нагрева, а также динамическим и вибрационным нагрузкам. При определенных сочетаниях и величинах отмеченных воздействий возникает потеря диском пилы плоской формы устойчивого равновесия, дальнейшее развитие событий проявляется в зарезании на сторону, заклинивании в пропиле, перегреве и т. п. Опыт применения показывает, что до 50% возникающего брака, аварийных и опасных ситуаций, простоев этого типа станков случается по причинам нарушения работоспособности круглых пил. Наиболее неблагоприятные условия для сохранения требуемого теплового состояния режущего инструмента наблюдаются в станках для продольной распиловки древесины. Это объясняется тем, что продолжительность нахождения пилы в пропиле в течение рабочего цикла значительно больше, чем в станках для поперечной распиловки.

Нагрев режущего инструмента в процессе пиления представляет собой объективно неотвратимое событие, возникающее в результате преобразования механической энергии, затрачиваемой на резание древесины, в тепловую энергию. Образующееся тепло распространяется большей частью в инструмент, оставшаяся часть поступает в древесину и окружающую среду.

Характер распределения тепла в пильном диске достаточно глубоко изучен [3; 4] и при установившемся тепловом режиме, сосредотачивается по внешнему контуру и далее, за счет теплопроводности, распространяется по радиусу. Так как тепловое сопротивление по радиусу многократно больше, чем в осевом

направлении, конвективный теплообмен диска происходит по кольцу, примыкающего к окружности межзубовых впадин, шириной от 0,15 до 0,20 долей радиуса. Тепловое состояние центральной части диска остается практически неизменным, температура не отличается от температуры окружающего воздуха. Таким образом, образуется температурный перепад ΔT между периферийной и центральной частями, возникают температурные напряжения металла корпуса пилы.

Величина температурного перепада имеет предельное значение, и в дальнейшем будем считать, что сохранение нормальных условий процесса пиления возможно при значениях ниже предельного.

Все причины, вызывающие возникновение запредельных значений ΔT можно условно разделить на две группы: внешние и внутренние.

В группу внешних входят: технологические (вид и свойства распиливаемых материалов, параметры и условия технологического процесса) и организационные (квалификация персонала, организация работ по обслуживанию оборудования и инструмента).

В группу внутренних причин входят инструментальные (параметры и состояние пильного диска) и станочные (состояние узлов и механизмов, конструктивные особенности).

Анализ причин показал, что вероятность возникновения запредельных значений ΔT наиболее высока в многопильных бревнопильных и брусопильных станках проходного типа с высокой скоростью подачи. Но, при этом производственники отмечают, что при определенных обстоятельствах «сжечь» пилу можно и на однопильных станках при распиловке тонкомерных древесных материалов.

В связи с выше изложенным, задачей исследования являлось определение условий и создание модели температурного контроля и прогнозирования теплового состояния круглых пил в процессе продольного пиления древесины.

1. Условия выполнения температурного контроля круглых пил

Для измерения температуры вращающегося пильного диска наиболее эффективным представляется метод бесконтактного измерения с помощью радиационных пирометрических средств.

Условия, подлежащие учету и выполнению, при использовании пирометров, подразделяются на три группы. Первая группа включает параметры средства измерения, вторая – свойства объекта измерения, третья – условия измерения и процесса пиления.

Обязательно учитываемыми параметрами пирометрических средств являются: показатель визирования, точность, скорость и диапазон измерений, габаритные размеры, способ передачи и возможность хранения результатов измерения.

Предпочтение следует отдавать низкотемпературным пирометрическим датчикам, работающим в «длинноволновом» диапазоне инфракрасного излучения (8...14 мкм), с показателем визирования не более 1/10, с возможностью регулировки коэффициента теплового излучения $\mathcal{E}_п$.

Характер поведения дисковой пилы при нагреве процессе пиления и допустимая величина ΔT , в первую очередь от конструктивных зависят от конструктивных параметров: диаметра диска (включая зубчатый венец) D , диаметров внутреннего (посадочного) отверстия d_i зажимных фланцев d_f , толщины s , высоты h_z и числа зубьев z .

Максимально допустимый температурный перепад по радиусу диска:

$$\Delta T_{дон}^{\max} = 0,85 \Delta T_{\partial y}^{\min} \quad (1)$$

$\Delta T_{\partial y}^{\min}$ – температурный перепад, соответствующий началу потери динамической устойчивости пильного диска [5]:

$$\Delta T_{\partial y}^{\min} = \frac{k_n^2 \cdot v_\lambda^2 - n (\lambda^2 - B)}{82,2 \cdot 10^5 \cdot \frac{f''(c, \lambda)}{R_\rho^2}}, \quad (2)$$

где n – рабочая частота вращения пильного вала;

λ – число узловых диаметров;

v – скорость резания, м/с;

$f_{0(c,\lambda)}''$ – безразмерная функция;

c – отношение диаметра фланцев к диаметру диска;

R_p – расчетный радиус пилы, мм.

Для ограниченного числа круглых пил имеются сведения о значениях допустимых температурных перепадов в справочной литературе [4; 5].

Следующим параметром, непосредственно влияющим на результаты измерения, является коэффициент теплового излучения (КТИ) [1], который в свою очередь определяется свойствами материала и состоянием поверхности корпуса пильного диска.

Экспериментальными исследованиями, методом активного теплового воздействия, было установлено, что корпуса пил, изготовленные из низколегированных инструментальных сталей, относятся к группе «несерых» тел. То есть КТИ не является постоянной величиной, зависит от температуры нагрева пилы T и температуры окружающего воздуха T_a .

Для использования в модели контроля температурного состояния предлагаются уравнения регрессии, полученные при обработке результатов экспериментов для пил, изготовленных из сталей [7; 8]:

– 9ХФ (РФ)

$$\varepsilon = 0,56 - 0,005T - 0,025T_a + 0,000024T^2 + 0,0013T_a^2 - 0,000025TT_a; \quad (3)$$

– 80CrV2 (ФРГ)

$$\varepsilon = 0,48 - 0,004T - 0,003T_a + 0,00002T^2 + 0,0003T_a^2 - 0,00005TT_a. \quad (4)$$

При использовании пирометров с фиксированным значением КТИ:

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_{\Pi}^n - \varepsilon_{\Pi}(T^n - T_a^n) - T_a^n}{T_a^n - T^n}, \quad (5)$$

где T_{Π} – температура, показываемая пирометром, °К,

n – показатель степени в функции Планка, зависит от спектрального диапазона пирометра, для длинноволнового диапазона равен 4,83.

В третью группу входят технологические показатели (скорость подачи u , длина L_d и порода материала) параметры установки пирометрического датчика (датчиков).

Установка пирометрических датчиков должна выполняться с учетом основных параметров круглопильного станка: расположение и направление вращения пильного вала, направление подачи, наличие и характеристики эксгаустера и ограждений.

Монтажная позиция выбирается таким образом, чтобы на измерение температуры поверхности диска минимизировать влияние распиливаемого материала, образующихся отходов и возможного нагрева электродвигателя других деталей (подшипников, корпусов, крышек и т. д.).

Параметры, определяющие положение пирометрического датчика в станке: угол между вертикальной плоскостью, проходящей через центр пильного диска и осью луча сканирования φ ; расстояние от центра диска до центра площади сканирования R_c ; расстояние от плоскости диска пильного диска до центра линзы датчика L_c .

Угол φ измеряется по направлению вращения пильного диска. Для станков с верхним расположением пильного вала он составляет $45^\circ (\pm 45^\circ)$, с нижним – $225^\circ (\pm 45^\circ)$.

Для повышения точности температурного контроля в системе контроля рекомендуется использовать два пирометрических датчика, одновременно измеряющих температуру на границе зажимного фланца и на кольце, примыкающего к межзубовым впадинам.

2. Контроль температуры пильного диска

Для подтверждения результатов теоретических исследований, получения дополнительной информации о тепловом состоянии круглых пил, а так же для установления пригодности пирометров для измерения температуры в реальных условиях распиловки на круглопильных станках, были выполнены экспериментальные исследования на станках СД-1, Ц6–2 и ЦДК-4–2.

В ходе экспериментальных исследований устанавливалась температура пильного диска T и скорость ее изменения V_T пильных дисков во время рабочего и холостого ходов (рис. 1–3).

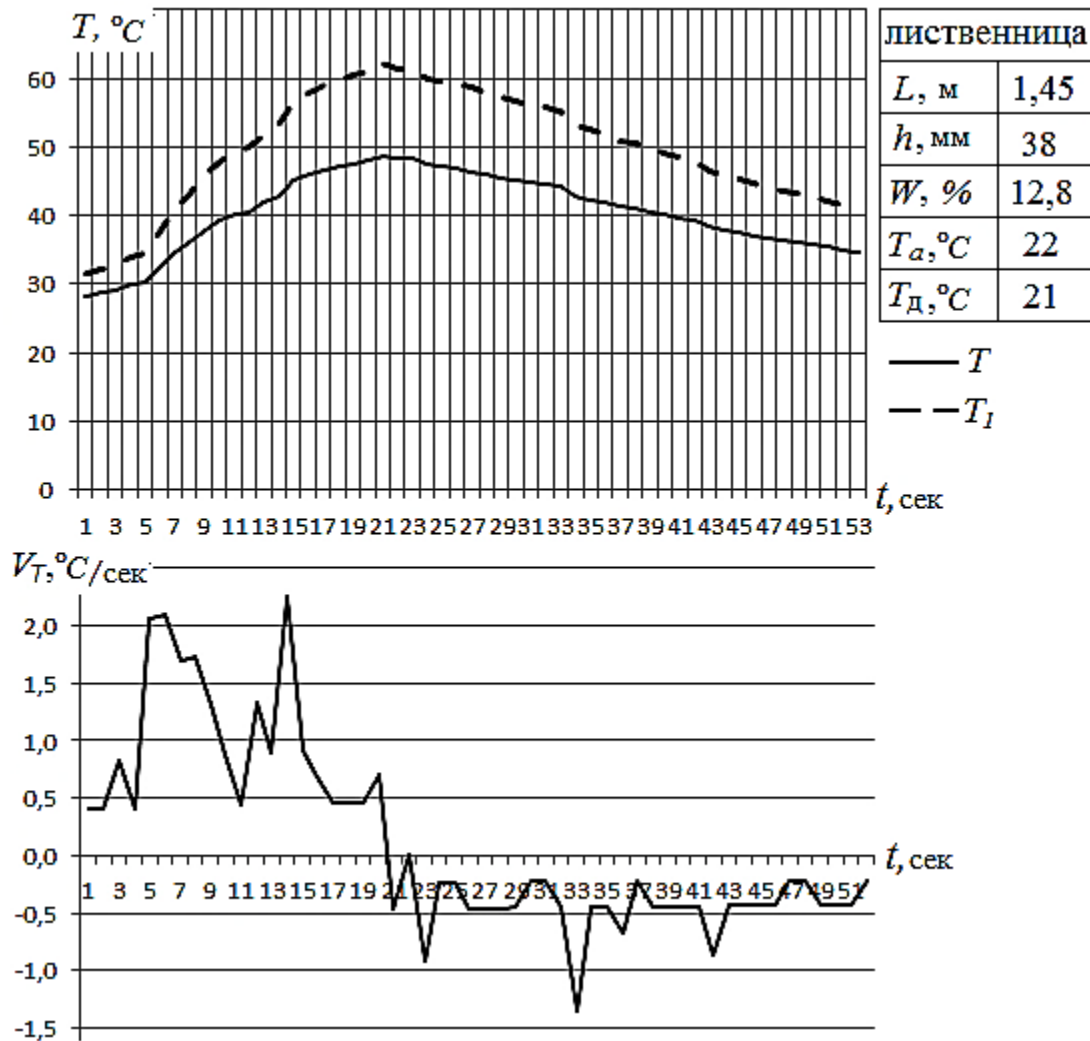


Рис. 1. Результаты измерений на станке СД-1

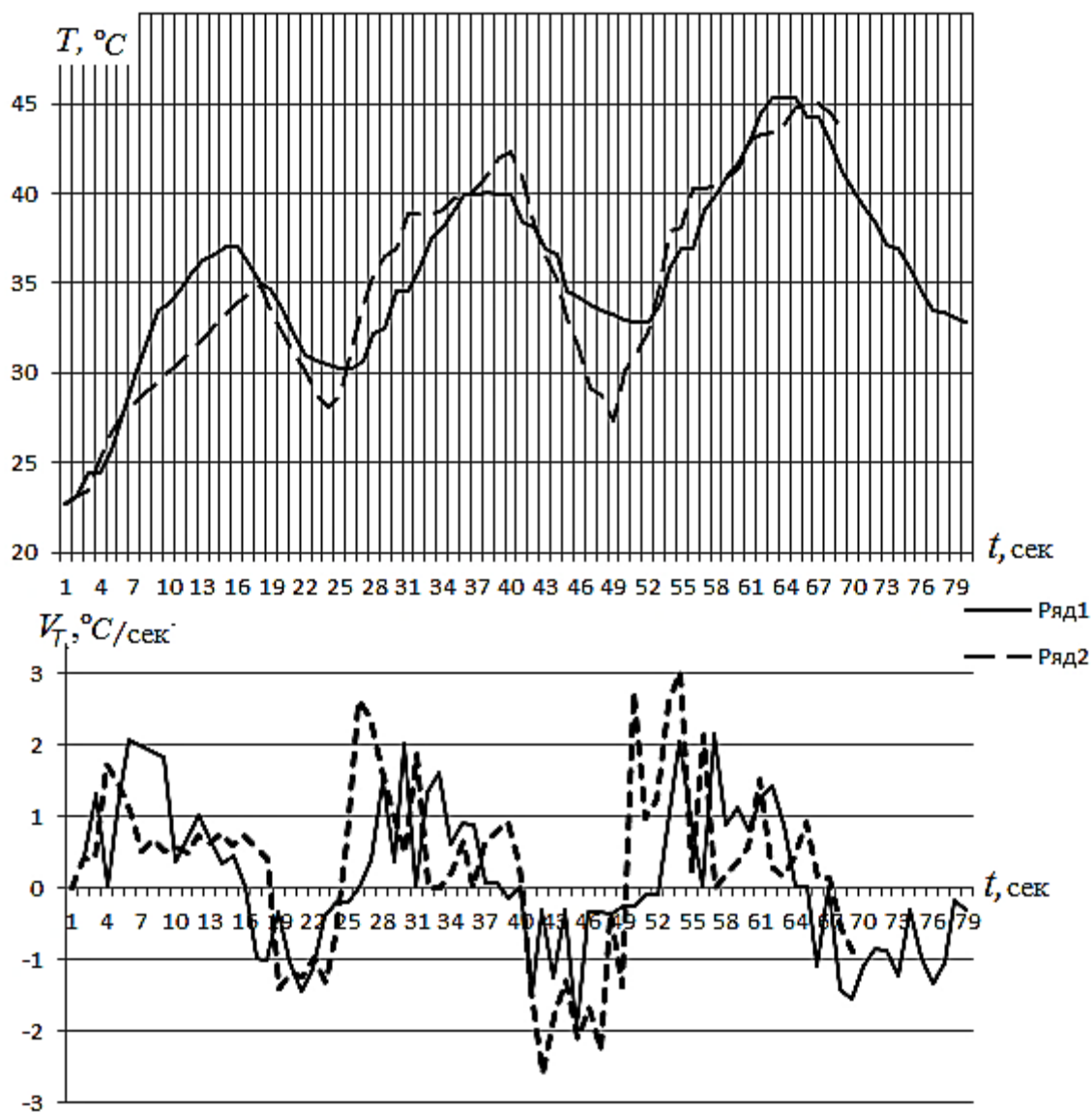


Рис. 2. Результаты измерений на станке Ц – 6

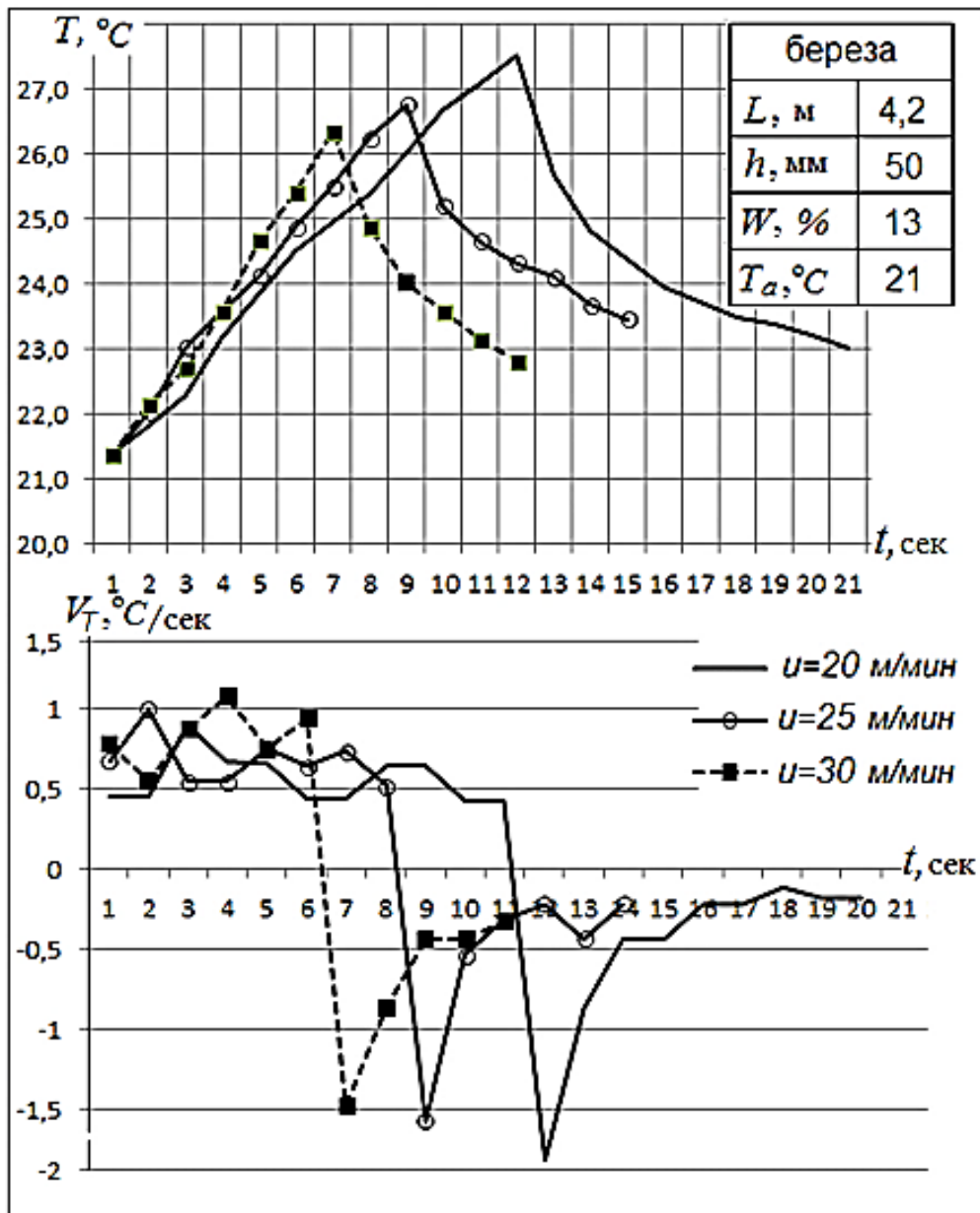


Рис. 3. Результаты измерений на станке ЦДК – 4

В ходе экспериментальных исследований установлено, что нагрев и охлаждение пильного диска во время пиления являются нестационарными процессами теплопроводности, скорость изменения температуры является величиной непостоянной. Температура изменяется быстрее в начале рабочего и холостого ходов.

При нормальных условиях пиления, отсутствии дополнительного трения пильного диска, скорость нагрева при исследованных условиях не превышает 3 °C/сек . В случае нарушения нормальных условий скорость нагрева увеличивается в два и более раз.

3. Прогнозирование теплового состояния режущего инструмента

В основе прогнозирования заложена концепция прогнозирования остаточного ресурса механизмов и деталей машин, отказы которых вызываются процессами накопления повреждений [2]. Под остаточным ресурсом принят запас времени сохранения устойчивой плоской формы пильного диска после момента контроля его состояния, тем самым обеспечивается его работоспособность. В рассматриваемом случае остаточный ресурс обеспечивается минимальной величиной температурного перепада.

В качестве параметра прогнозирования (ПП) принимаем температуру пильного диска T_R в кольце, примыкающего к межзубовым впадинам. Данный параметр прогнозирования является косвенным технологическим, так как зависит от таких прямых параметров процесса как скорость резания, скорость подачи, размеры пилы и распиливаемого материалы и др.

Цель прогнозирования нагрева пильного диска в процессе пиления заключается в том, чтобы на основе измерений температуры заранее определить момент возможного полного исчерпания остаточного ресурса, условием которого является:

$$\Delta T = \Delta T_{дон}^{\max} \quad (6)$$

Далее потребуется выполнить действия по снижению текущего температурного перепада, и тем самым предотвратить возможный отказ.

Для снижения температурного перепада в процессе пиления могут применяться охлаждение зубчатого венца с периферийной частью диска или нагрев средней зоны диска.

Наиболее эффективно охлаждение водой и водо-воздушной смесью. Но если в конструкции станка не предусмотрено принудительное охлаждение, то следует иметь в виду, что охладить диск возможно увеличив продолжительность холостого хода.

При этом продолжительность холостого хода следует определять исходя из значения допустимой температуры в начале рабочего хода T_n . Тогда время на охлаждение можно ориентировочно определить [6]:

$$t = -\frac{c_p \rho b}{2\alpha} \ln \frac{T_n - T_a}{T - T_a}, \quad (7)$$

где c_p – удельная теплоемкость материала диска пилы, Дж/(кг*К);

ρ – плотность материала диска, кг/м³;

b – толщина диска, м;

α – коэффициент теплоотдачи.

При условии, что температура диска в районе фланца T_d измеряется отдельным пирометрическим средством и равна температуре воздуха, величина остаточного ресурса допустимого температурного перепада в i -й момент времени:

$$\Delta T_i^{ocm} = \Delta T_{don}^{max} - (T_{Ri} - T_a). \quad (8)$$

Период достоверного прогнозирования по реализации t_n составляет не более периода контрольной наработки t_k , который в нашем случае принят в 3 секунды. Полагаем, что период прогнозирования размером в 3 секунды можно считать достаточным, чтобы после получения информации о возникновении возможного отказа, предпринять управляющие воздействия для его предотвращения.

Определив среднее значение скорости изменения температуры V_{Tcpi} , и допуская, что данная случайная величина изменяется по нормальному закону, можно установить минимальное и максимальное значения скорости изменения температуры в прогнозируемом интервале:

$$V_{Ti}^{B(H)} = V_{Tcpi} \pm U_\gamma \cdot \sigma / \sqrt{n}, \quad (9)$$

где U_γ – квантиль нормального распределения, при доверительной вероятности γ ;

σ – среднее квадратическое отклонение;

n – число значений измерений в интервале.

При уровне значимости 0,95 прогнозируемые максимальное («верхнее») и минимальное («нижнее») значения температуры формируют «конус» прогноза в конце периода прогнозирования (рис. 4) и рассчитывается по формуле:

$$T_{\Pi i}^{B(H)} = T_i + V_{T_{cpi}} t_i \pm 2,48 \cdot \sigma . \quad (10)$$

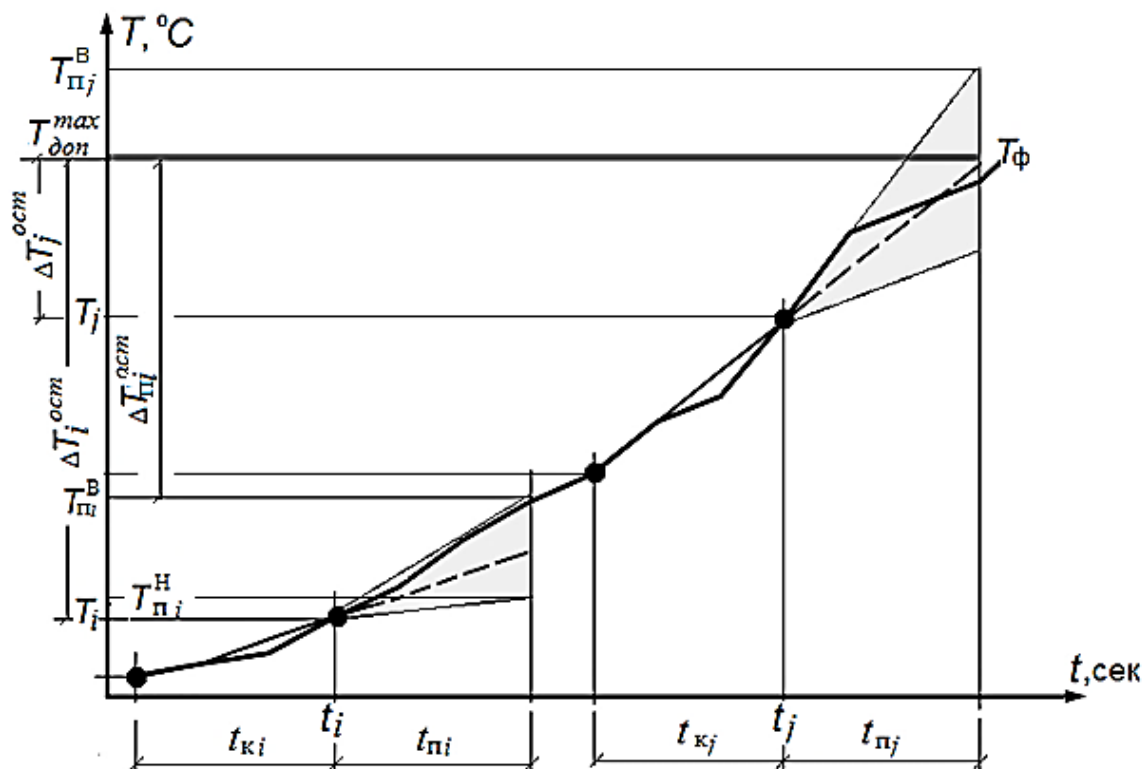


Рис. 4. Графическая интерпретация процесса прогнозирования

Для определения размера остаточного ресурса принимаем верхнее значение температуры периода прогнозирования:

$$\Delta T_{\Pi i}^{ост} = T_{дон}^{max} - T_{\Pi i}^B \quad (11)$$

При выполнении условия $\Delta T_{\Pi i}^{ост} > 0$ следует полагать, что процесс пиления происходит в нормальном температурном режиме, кардинальные вмешательства не требуются.

Если в какой – то момент контроля и прогнозирования t_j окажется, что $\Delta T_{\Pi j}^{ост} \leq 0$ и, следовательно, возможно исчерпание остаточного ресурса до окончания периода прогнозирования, то необходимо определить время до момента окончания рабочего хода:

$$t_p^{ост} = t_p - t_j = L_d / u - t_j . \quad (12)$$

При условии, что пиление закончится раньше, чем прогнозируемый период, т.е. $t_p^{ocm} < t_{пj}$ то вмешательства не требуется. В противном случае $t_p^{ocm} \geq t_{пj}$, и для исключения превышения температурного перепада пильного диска сверх допустимого значения необходимо предпринять соответствующие меры (охлаждение или остановка подачи). Следует заметить, что отказ при полном исчерпании остаточного ресурса не является событием достоверным, поэтому прекращение пиления следует обеспечивать при достижении температурного перепада, соответствующий началу потери динамической устойчивости пильного диска.

Модель контроля и прогнозирования теплового состояния представлена на рис. 5 и состоит условно из трех блоков. Блок «А» предназначен для ввода исходных данных и выполнения определенных вычислений, результаты которых в процессе пиления не изменяются.

Операторы блока «В» обеспечивают выполнение температурного контроля с постоянным интервалом между реализациями, величина которого принята равной 1 секунде. После запуска станка в рабочий цикл определяются температурные показатели, если температура в периферийной части диска изменяется, то проводится температурный контроль. В противном случае текущие показатели приводятся в исходное состояние, так как идет холостой ход, пиление не производится. В том случае, когда величина остаточного ресурса, по каким-либо причинам не превышает 0, соответствующие операторы направляет на генерацию сигнала о необходимости вмешательства вплоть до остановки пиления.

В блоке «С» осуществляется прогнозирование остаточного ресурса. Прогнозирование начинается по истечении контрольного периода в 3 секунды. На основании расчета средней скорости, температуры на верхней границе конуса прогнозирования и оставшегося времени на завершение рабочего хода, принимается решение о продолжении пиления, выработки стабилизирующего воздействия или остановки станка.

Так как нагрев пыльного диска прекращается по окончании рабочего хода, а холостой ход объективно сопровождается охлаждением, и соответственно, увеличением остаточного ресурса, то температурный контроль проводится без прогнозирования.

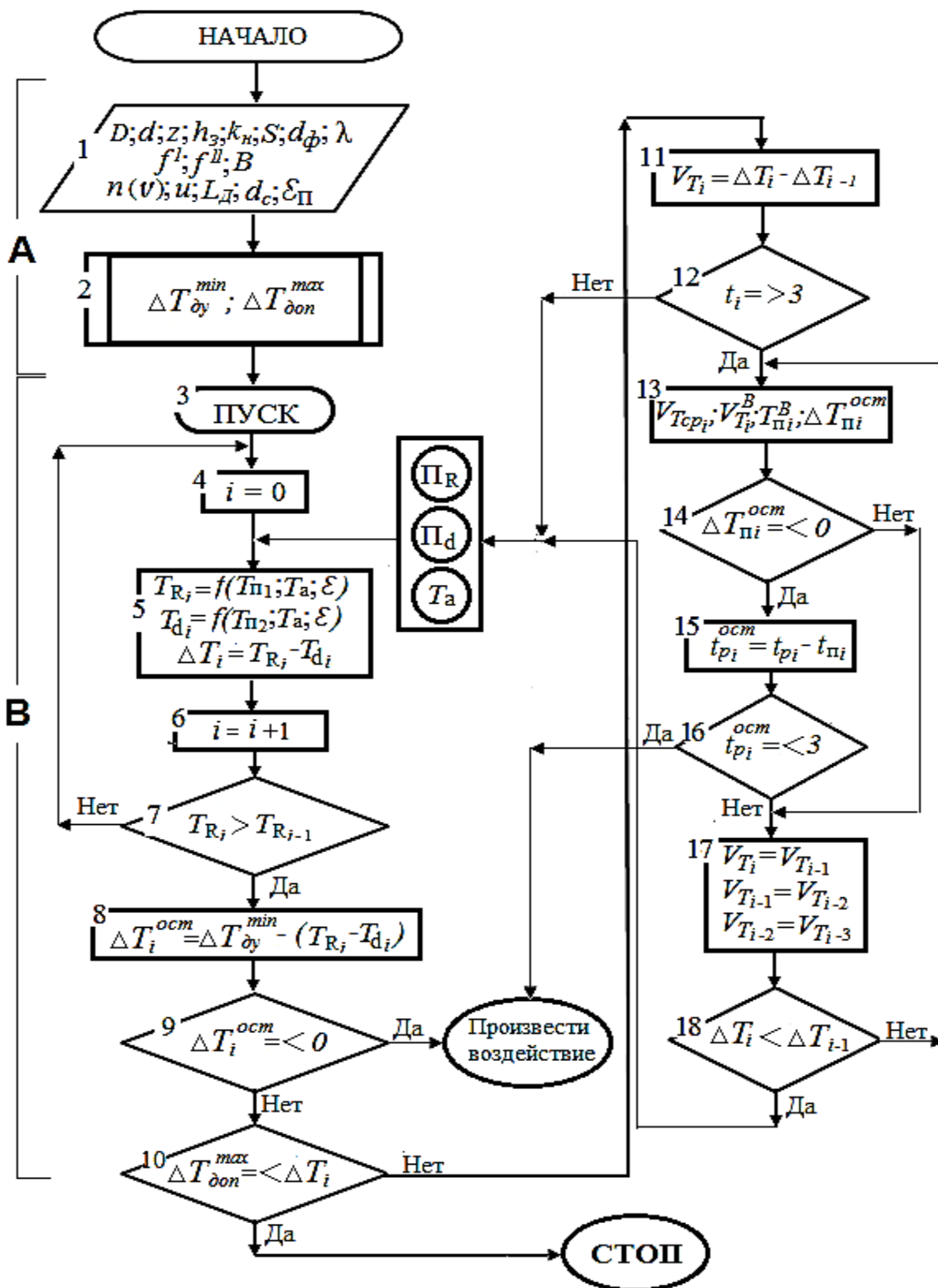


Рис. 5. Модель контроля и прогнозирования

Результаты выполненных исследований имеют научное и практическое значение. Разработанный алгоритм контроля и прогнозирования может быть применен в аппаратных устройствах систем автоматизированного управления круглопильных станков.

Список литературы

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
2. Михлин В.М. Прогнозирование технического состояния машин / В.М. Михлин. – М.: Колос, 1976. – 288 с.
3. Пашков В.К. Обеспечение работоспособности круглых пил при пи-лении древесины: Дис. ... д-ра техн. наук / В.К. Пашков. – СПб.: СПбЛТА, 1998. – 322 с.
4. Стахиев, Ю.М. Работоспособность круглых пил / Ю.М. Стахиев. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 384 с.
5. Стахиев Ю.М. Руководящие технические материалы по определению режимов пиления древесины круглыми пилами / М.Ю. Стахиев, В.К. Пашков. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1988. – 74 с.
6. Хвиюзов М.А. Расчет времени охлаждения круглых пил в период холостого хода / А.Н. Галашев, М.А. Хвиюзов // Лесн. журн. – 2013. – №1/331. – С. 82–87.
7. Хвиюзов М.А. Расчет температуры нагрева поверхности пильного диска при осуществлении пирометрического контроля / М.А. Хвиюзов, А.Н. Галашев, // Лесн. журн. – 2013. – №4/334. – С. 60–65.
8. Хвиюзов М.А. Совершенствование узла резания круглопильных станков для продольной распиловки древесины: Дис. ... д-ра техн. наук / М.А. Хвиюзов. – Архангельск: САФУ, 2016. – 156 с.

Хвиюзов Михаил Андреевич – канд. техн. наук, преподаватель ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», Россия, Архангельск.

Галашев Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и безопасности жизнедеятельности ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», Россия, Архангельск.
