

Влияние параметров режима на технологические характеристики операции электроэрозионной прошивки отверстий в форсунках

Белов И.И., Груздев А.А., д.т.н. проф. Саушкин Б.П.

Университет машиностроения

dron_1111@mail.ru 89151754663

Аннотация. В работе экспериментально установлено влияние длительности импульса на время обработки и степень износ ЭИ для операции электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра на специальном прошивочном станке. Получена зависимость скорости эрозии от глубины отверстия. Выявлены статистические закономерности, описывающие распределение значений времени обработки и износа ЭИ. Предложены технические решения, направленные на повышение стабильности процесса прошивки отверстий.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка (ЭЭО), электроэрозионная прошивка, отверстия малого диаметра, прошивка отверстий.

Проблема получения глубоких отверстий малого диаметра, особенно в материалах, трудно обрабатываемых резанием [1], является актуальной в современном машиностроительном производстве. Такие отверстия применяются в качестве элементов системы охлаждения в лопатках турбин, деталях горячей части двигателей и теплообменников, в форсунках различного вида и назначения.

Одним из наиболее эффективных методов получения отверстий малого диаметра в труднообрабатываемых материалах является электроэрозионная обработка (ЭЭО) [2]. Это метод бесконтактного формообразования, следовательно, исключается брак детали вследствие поломки инструмента в отверстии, характерный для обработки резанием. Скорость обработки зависит от теплофизических свойств материала и мало зависит от его механических характеристик. При ЭЭО отверстий формообразующим элементом является проволока, все её дефекты (форма сечения, неравномерность диаметра по длине) будут сказываться на качестве получаемых отверстий. При получении отверстий малого диаметра и большой длины ($L/d = 10 \dots 15$) жёсткость проволоки уменьшается, что также искажает профиль отверстия. При этом затрудняется эвакуация продуктов эрозионного разрушения из рабочей зоны, что негативно сказывается на производительности обработки и качестве профиля отверстия.

На практике во избежание подобных осложнений используют калиброванную проволоку, подаваемую в зону обработки через кондукторную втулку, изготовленную из износостойкого диэлектрического материала. Электроду придается вращательное движение, которое устраняет овальность получаемого отверстия. Для повышения точности при сквозном прошивании отверстий с соотношением длины к диаметру 20 и выше, применяют черновой и чистовой проход, широко используют обработку полыми электродами с прокачкой рабочей среды через внутреннее отверстие (многоканальные трубчатые электроды) [3], разработаны шнековые электроды, обеспечивающие эффективное удаление продуктов разрушения из обрабатываемого отверстия.

Сравнительная характеристика ЭЭО и механического сверления отверстий приведена в таблице 1.

ЭЭО широко применяется для изготовления отверстий диаметром 0,2...2 мм в форсунках различных двигателей. Эти отверстия характеризуются высокой точностью и повышенными требованиями к качеству поверхностного слоя.

Отечественным предприятием ФГУП «НПО «Техномаш» для прошивки отверстий в форсунках разработан специальный станок ЭПП-8 (рисунок 1). Для анализа производственных возможностей этого станка проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены ниже. Отверстия прошивали в форсунках-образцах из стали 12Х18Н10Т (рисунок 2), в качестве рабочей жидкости использовали техническую воду, подаваемую под давлением.

Станок оснащен современным транзисторным генератором импульсов, который позво-

ляет регулировать режимы обработки и параметры системы слежения в достаточно широком диапазоне. Станок оснащён отечественной системой ЧПУ (ДГТ-735-6К). Станок пятикоординатный, имеет четыре программируемые координаты (Z , X , Y , U) и одну наладочную (ϕ). Координата U обеспечивает поворот заготовки на заданный угол. По координате ϕ регулируют угол наклона отверстия (изменяя угол наклона форсунки). Координаты Y и ϕ настраиваются перед началом обработки и в её процессе не изменяются, а по координатам Z , X , U происходит перемещение заготовки в процессе обработки.

Таблица 1

Технологические возможности получения малых отверстий

Технологический показатель	Вид обработки	
	Сверление	ЭЭО
Минимальный диаметр отверстия, мкм	25	25
Точность обработки	IT12...IT14	IT9...IT12
Шероховатость поверхности R_z , мкм	20...40	0,06...20
Достижимое отношение глубины к диаметру	8:1	200:1
Материалы	Лёгко обрабатываемые резанием	Любые электропроводные материалы

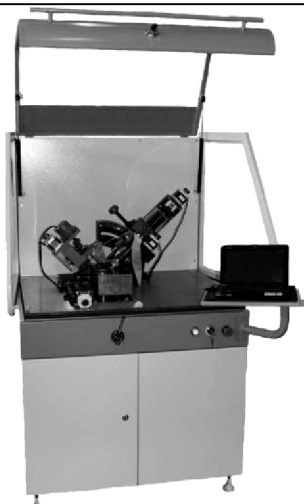


Рисунок 1 – Станок ЭПП-8



Рисунок 2 – Тангенциальные отверстия в образцах форсунок

Циклограмма обработки одного отверстия с периодической подрезкой электрода-инструмента (ЭИ) представлена на рисунке 3. Данная циклограмма используется для синхронизации перемещений, совершаемых по координатам Z , X , U . По оси Z отложено перемещение электрода-инструмента, по оси X отложено перемещение каретки с электроэрозионной головкой, по оси U отложено угловое перемещение форсунки. В данной циклограмме работы станка можно выделить следующие временные интервалы.

Период времени t_1-t_2 – период касания (ось Z): электрод-инструмент и деталь находятся под небольшим напряжением относительно рабочего, система слежения и вибратор выключены, электрод-инструмент из начального положения движется к детали ($t_0-t_0.1$), касается её, вследствие чего происходит короткое замыкание (момент времени $t_0.1$), координата, в которой произошло короткое замыкание, «обнуляется», и относительно нее отсчитывается величина линейного перемещения электрода-инструмента, заданного в программе. Электрод-инструмент отходит на рабочий зазор ($t_0.1-t_1$).

Период времени t_1-t_2 – период обработки (ось Z). После того как электрод-инструмент отошёл на рабочее расстояние (момент времени t_1), включается система слежения и вибратор и начинается прошивка отверстия (до момента времени t_2). При прошивке отверстия существует вероятность короткого замыкания, вследствие того что электрод-инструмент упрётся в деталь (момент времени $t_{1.1}$) из-за слишком большой рабочей подачи или нестабильности

процесса, поэтому на данном станке установлена система слежения.

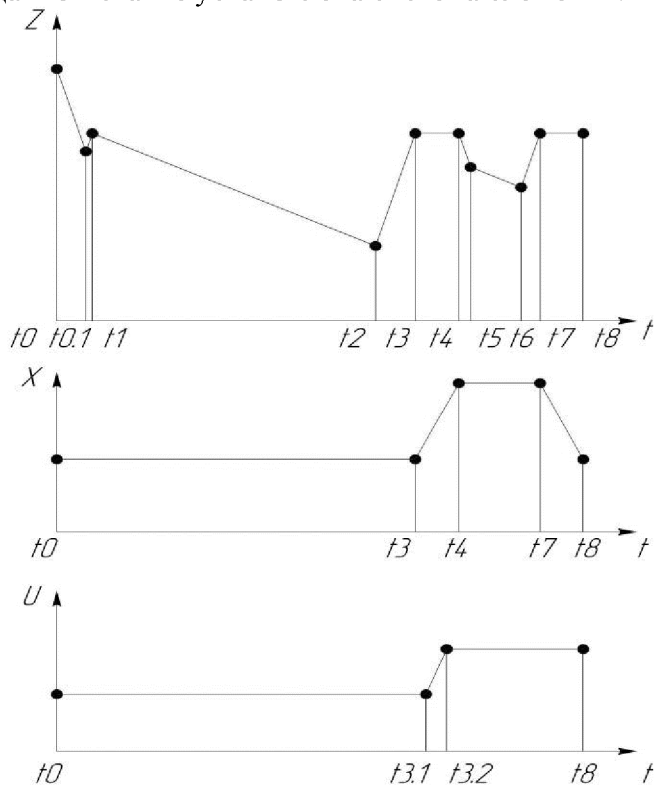


Рисунок 3 – Циклограмма работы станка ЭП8

Работает система слежения в зависимости от задаваемых оператором параметров следующим образом. При контакте ЭИ с деталью происходит короткое замыкание. По получении заданного оператором числа последовательных импульсов короткого замыкания система слежения останавливает рабочую подачу ЭИ, отводит его с заданной оператором скоростью на расстояние, большее рабочего торцевого зазора. ЭИ останавливается на этом расстоянии на заданное оператором время, необходимое для промывки межэлектродного зазора, после чего включается рабочая подача. После того как ЭИ достигнет рабочего торцевого зазора, обработка продолжается.

Период времени t_2-t_3 – период возвращения (ось Z). Когда ЭИ прошёл заданное оператором расстояние (момент времени t_2), необходимое для прошивки и калибровки отверстия, выключаются электроэрозионный генератор, система слежения и вибратор. ЭИ возвращается с максимальной скоростью в «ноль» по оси Z , зафиксированный в момент времени (t_1).

Период времени t_3-t_4 – период перемещения к правящему элементу (ось X) + поворот (ось U). После того как ЭИ вернулся в «ноль» по оси Z (момент времени t_4), каретка передвигает электроэрозионную головку из положения «ноль» по оси X к правящему элементу (выполненному из более тугоплавкого материала, чем ЭИ). В это время форсунка поворачивается на место прошивки следующего отверстия (период времени $t_{3.1}-t_{3.2}$).

Периоды времени t_4-t_5 , t_5-t_6 , t_6-t_7 аналогичны периодам t_0-t_1 , t_1-t_2 , t_2-t_3 соответственно, с той разницей, что период обработки (в данном случае подрезки) проходит при обратной полярности (правлящий элемент обрабатывает ЭИ).

Период времени t_7-t_8 – период возвращения (ось X). После того как будет произведена подрезка ЭИ каретка перемещает электроэрозионную головку к месту прошивки следующего отверстия в форсунке.

На станке ЭП8-8 проводились эксперименты с целью выявления зависимостей времени обработки и износа ЭИ от длительности импульса при прошивке отверстия диаметром $\varnothing 0,76$ мм и глубиной 3 мм. Использовали прямую полярность подключения электродов, длительность импульса изменяли в диапазоне 0,4...3 мкс. Предварительно установлена частота следования импульсов, обеспечивающая стабильное протекание процесса в данном диапазоне длительностей импульса $f = 5$ кГц. Энергетические параметры импульсов соответствовали

рекомендациям [4].

При проведении прошивки фиксировали машинное время обработки t_m и измеряли линейный износ инструмента I . По результатам измерений получены зависимости, графически представленные на рисунке 4.

Как видно, зависимость времени обработки от длительности импульса носит гиперболический характер. При неизменных электрических параметрах разрядного импульса энергия разряда пропорциональна длительности импульса. Принимая во внимание зависимость объемной производительности от энергии импульса, можно объяснить гиперболический характер полученной экспериментальной кривой.

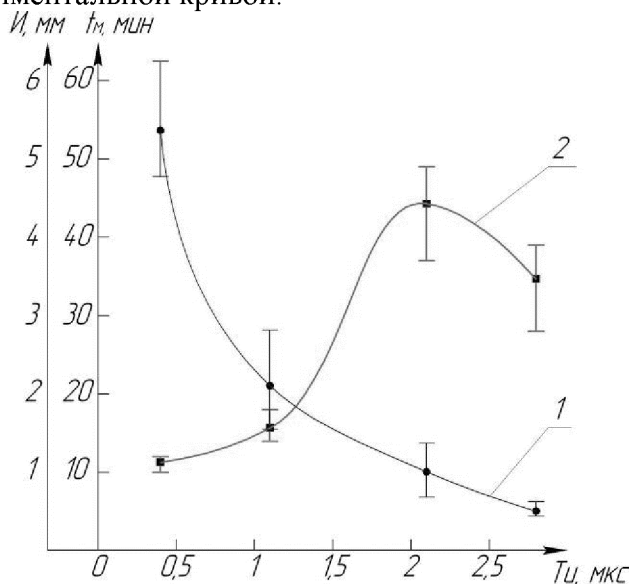


Рисунок 4 – Графики зависимостей машинного времени обработки (1) и износа ЭИ (2) от длительности импульса

Зависимость линейного износа ЭИ от длительности импульса описывается кривой с максимумом. Возможное объяснение этому сводится к следующему. ЭИ разрушается в нашем случае за счет бомбардировки поверхности относительно тяжелыми анионами. При увеличении длительности импульса количество энергии, передаваемой заряженными частицами ЭИ, возрастает, и наблюдается снижение его массы. При достаточно длительных импульсах плотность ионного потока на ЭИ возрастает настолько интенсивно, что становятся значимыми потери энергии, связанные с частотой столкновения ионов. Поэтому суммарный поток энергии на ЭИ более не возрастает и даже, судя по экспериментальным данным, несколько снижается.

Экспериментально получены зависимости скорости эрозии от степени заглубления электрода-инструмента в тело детали при изготовлении отверстий с теми же геометрическими параметрами. На дисплее компьютера отсчитывали линейное перемещение ЭИ (h_n) как функцию времени. Отсчет h_n производили относительно точки касания ЭИ с деталью. Для каждого прошитого отверстия измеряли суммарный износ инструмента. Измерения производили по три раза для каждой длительности импульса. В качестве примера в таблице 2 приведены данные, полученные при длительности импульса 2,8 мкс.

Таблица 2

Результаты эксперимента для длительности импульса $\tau_{\text{и}} = 2,8$ мкс

№ эксперимента	$I, \text{мм}$	$h_n, \text{мм}$	1	2	3	4	5	6	7
1.1	3,7	$t, \text{мин}$	0,5	1,13	1,92	2,67	3,42	4	4,42
1.2	3,9	$t, \text{мин}$	0,5	1	1,83	2,75	4,08	5,42	6,25
1.3	2,8	$t, \text{мин}$	0,5	1,08	1,67	2,5	3,5	4,5	—

При выполнении условия постоянства межэлектродного промежутка в процессе про-

шивки (торцевой зазор) получаем выражение, справедливое для любого момента времени

$$V_{\text{л}} - V_{\text{и}} = V_{\text{э}}, \quad (1)$$

где: $V_{\text{л}}$ – линейная скорость перемещения ЭИ,

$V_{\text{и}}$ – скорость износа ЭИ,

$V_{\text{эп}}$ – скорость эрозии.

Учитывая, что $V_{\text{л}} = dh_{\text{л}}/dt$, по экспериментально полученной зависимости $h = h(t)$ находили мгновенные значения $v_{\text{л}}$ и по выражению (1) рассчитывали скорость эрозии детали. Результаты расчетов представлены на рисунке 5.

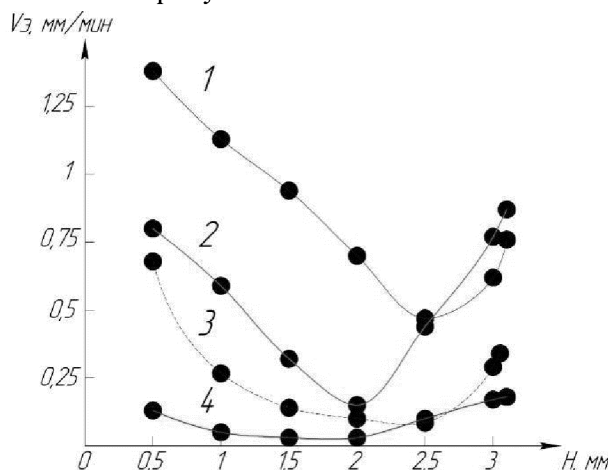


Рисунок 5 – Зависимости скорости эрозии от заглубления ЭИ в тело детали при длительностях импульса, мкс: 1-2,8; 2-2,1; 3-1,1; 4-0,4

Из представленных данных следует, что при всех значениях длительности импульса скорость эрозии заметно убывает с заглублением инструмента. Эта закономерность является общей для всех операций электроэрозионной прошивки отверстий и объясняется замедленностью скорости эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. Видно, что с уменьшением длительности импульса снижение скорости эрозии становится менее заметным из-за соответствующего уменьшения объема продуктов эрозии, генерируемого в единицу времени. На глубине $H = 2 \dots 2,5$ мм на соответствующих кривых имеется минимум, после которого скорость эрозии начинает увеличиваться. Это связано с тангенциальным характером прошиваемого отверстия, в результате чего происходит «вскрытие» доньшка отверстия в ограниченной области. Отверстие становится сквозным, улучшается вывод продуктов эрозии. Обработка идёт до $H = 3$ мм.

Разные значения глубины отверстий, на которой наблюдается минимум скорости прошивки, можно объяснить приближенным характером допущения о постоянстве скорости износа инструмента.

Известно, что при проведении процесса электроэрозионной прошивки отверстия проявляется множество случайных факторов, влияющих на результат. В связи с этим нами проведена статистическая обработка данных на основании результатов прошивки 150 отверстий диаметром $0,76^{+0,025}$ мм шероховатостью $Rz = 40$ мкм. Диаметр отверстия измеряли на инструментальном микроскопе, время обработки фиксировали автоматически, износ инструмента фиксировали по касанию поверхности детали до и после обработки. Прошивку отверстий производили при длительности импульса 2,8 мкс и частоте следования импульсов 5 кГц.

Установлено, что поле рассеяния размеров для всей партии обработанных деталей меньше поля допуска на размер, фактическая шероховатость поверхности отверстия Rz не превышает 40 мкм.

Машинное время обработки описывается довольно широким полем рассеяния. Результаты статистической обработки значений машинного времени представлены в таблице 3, а на рисунке 6 показаны эмпирическая и теоретическая кривые распределения.

Эмпирическая кривая распределения имеет колоколообразный характер, что позволяет приближенно описывать ее кривой нормального распределения. Теоретическую кривую рас-

пределения значений измеряемой величины находили по стандартной методике [5]. Согласно расчетам середина поля рассеяния теоретической кривой $T_{cp} = 5,79$ мин, среднеквадратичное отклонение $Q = 0,82$ мин. Поле рассеяния значений времени обработки $\omega = 6Q = 4,92$ мин.

Таблица 3

Результаты статистического исследования влияния случайных факторов на время обработки

№ интервала	Интервал	Середина интервала T	m	m/n	$m \cdot T$
1	3...3,5	3,25	1	0,00(6)	3,25
2	3,5...4	3,75	5	0,0(3)	18,75
3	4...4,5	4,25	8	0,05(3)	34
4	4,5...5	4,75	7	0,04(6)	33,25
5	5...5,5	5,25	16	0,10(6)	84
6	5,5...6	5,75	55	0,3(6)	316,25
7	6...6,5	6,25	35	0,2(3)	218,75
8	6,5...7	6,75	13	0,08(6)	87,75
9	7...7,5	7,25	9	0,06	65,25
10	7,5...8	7,75	1	0,00(6)	7,75
Σ			150		869

где: m – количество значений, попавших в интервал; n – общее количество значений.

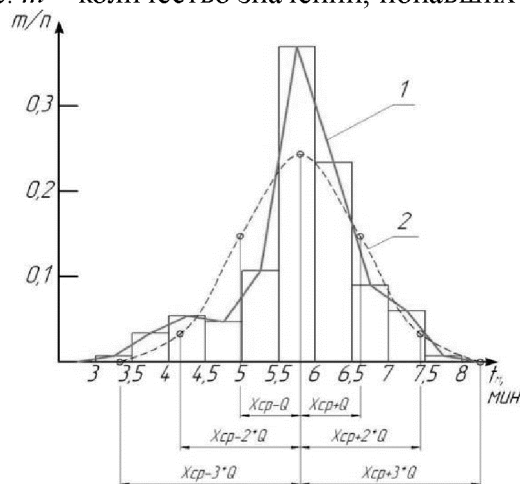


Рисунок 6 – Статистический анализ времени обработки: 1-эмпирическая кривая, 2-теоретическая кривая

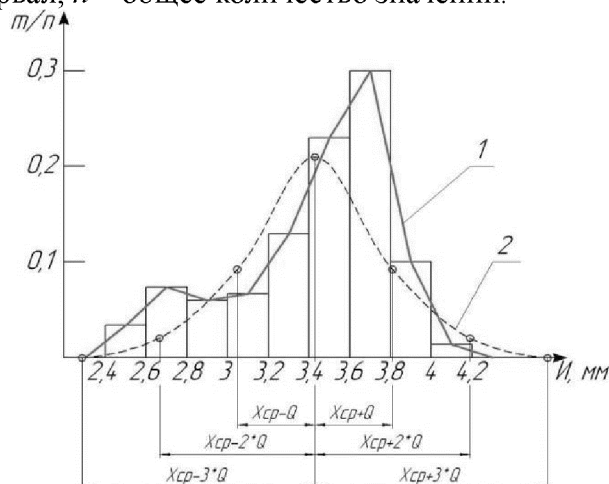


Рисунок 7 – Статистический анализ износа электрода-инструмента: 1-эмпирическая кривая, 2-теоретическая кривая

Статистическая обработка значений износа ЭИ проведена по аналогичной методике, а эмпирическая и теоретическая кривые распределения показаны на рисунке 7.

Гауссовский характер распределения значений времени обработки и износа ЭИ указывает на то, что процесс эрозионной прошивки протекает в условиях воздействия на него большого количества случайных факторов примерно равной значимости. С целью сужения поля рассеяния значений времени обработки и износа инструмента предложены технические мероприятия по конструктивному совершенствованию привода подачи рабочей головки и блока вибраций ЭИ.

Таким образом, экспериментально установлено влияние длительности импульса на время обработки и степень износа ЭИ для операции электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра на специальном прошивочном станке. Получена зависимость скорости эрозии от глубины отверстия. Выявлены статистические закономерности, описывающие распределение значений времени обработки и износа ЭИ. Предложены технические решения, направленные на повышение стабильности процесса прошивки отверстий. Показано, что при необходимости повышения качества поверхностного слоя прошитых отверстий электроэро-

зионная прошивка может осуществляться совместно с ЭХО (совмещенный процесс) или дополняться операцией электрохимической калибровки [6].

Результаты исследований могут быть использованы не только в производстве газотурбинных и жидкостных реактивных двигателей, но и при изготовлении форсунок автомобильных двигателей [7, 8].

Литература

1. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей. / А.Г. Братухин, Г.К. Язов, Б.Е. Карасев, Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин – М.: Машиностроение. 1997.
2. Электроэрозионная обработка отверстий малого диаметра. / Ю.С. Елисеев, А.Н. Трошин / Журнал Авиационная промышленность № 1. 2001.
3. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей. / Ю.С. Елисеев, Б.П. Саушкин; под ред. Б.П. Саушкина.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2010.
4. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. / Е.Ф. Немилов – Л.: Машиностроение. 1989.
5. Бенников В.С., Моргунов Ю.А., Саушкин С.Б., Саушкин Г.Б. Статистический анализ точности операции электрохимической обработки пера лопаток компрессора. Журнал «Известия МГТУ «МАМИ», 2009, с.87-91
6. Моргунов Ю.А., Саушкин С.Б. Структурное моделирование и классификация способов электрохимической размерной обработки. Журнал «Известия МГТУ «МАМИ», 2011, № 1, с. 184-188.
7. Шандров Б.В. Прогрессивные технологии автомобилестроения/Журнал автомобильных инженеров, № 6. 2004.
8. Максимов Ю.В., Абрамова А.Р., Кузьминский Д.Л., Мокринская А.Ю. К вопросу об обеспечении качества обработки сложнопрофильных деталей на станках с изменяющимися элементами. Известия МГТУ «МАМИ», № 1(13), 2012, с. 168-174.

Модели для расчета тепловых смещений шпиндельных узлов

к.т.н. доц. Иванников С.Н., Манаенков И.В.

Университет машиностроения

(495)223-05-23 доб. 1451, ivannikov.51@mail.ru

Аннотация. В статье приведено описание полуэмпирических моделей, разработанных на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований, для расчета тепловых смещений шпиндельных узлов при наиболее характерных режимах эксплуатации токарных станков.

Ключевые слова: шпиндельный узел, тепловые смещения, полуэмпирические модели, полином, экспонента.

Тепловые смещения шпиндельных узлов (ШУ) оказывают определяющее влияние на параметрическую надежность технологического оборудования в процессе его эксплуатации [1].

Существующие расчетные методы оценки тепловых смещений ШУ, как правило, трудоемки и не всегда позволяют получать достоверные результаты, т.к. в большинстве случаев основаны на весьма приближенных допущениях. Поэтому на практике более предпочтительными могут быть полуэмпирические модели, которые, учитывая физическую природу тепловых смещений, используют обобщенные данные натурных испытаний и, в конечном итоге, достаточно адекватно описывают изменение во времени выходных параметров точности ШУ вследствие тепловыделения.

При выборе математической модели для описания поведения выходных параметров технологического оборудования в процессе его эксплуатации необходимо учитывать харак-