

А. С. ГИШВАРОВ, А. Р. ФАТЫХОВА

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ПРИВОДА

Рассматривается структура предлагаемой авторами методики прогнозирования параметров наземной энергетической установки (газотурбинного привода) и приводятся результаты сравнительной оценки различных методов прогнозирования. *Газотурбинный привод, прогнозирование, наработка, параметры контроля*

Анализ зарубежных и отечественных публикаций показывает, что вопросам обеспечения контроля пригодности газотурбинных приводов (ГТП) и диагностики их состояния в эксплуатации придается большое значение. Актуальным является улучшение обслуживаемости ГТП, повышение надежности работы и снижение стоимости технического обслуживания. Разработка новых и совершенствование существующих диагностических средств представляет большой интерес для организаций газоперекачивающей отрасли и энергетики [1–3].

Физическое ухудшение состояния механических систем оказывает влияние на их характеристики только тогда, когда эти ухудшения уже значительно развились. Значительная часть наиболее критических неисправностей узлов и элементов ГТП имеют дремлющий, скрытый характер и поэтому могут быть выявлены только при глубокой, многосторонней диагностике.

Обычно до наступления опасного повреждения появляются неявные симптомы или тенденции, характеризующие отклонение ГТП от нормального состояния. Поэтому важно их вовремя распознать.

Развитие систем диагностирования возможно через интеграцию методов для выработки окончательных решений. Интеграция может происходить как на уровне принятия решений, так и на уровне оценки параметров.

При разработке алгоритмов диагностирования всегда следует учитывать вероятность неправильного измерения параметров, поэтому для всех систем ГТД должны быть разработаны алгоритмы проверки достоверности измерения параметров, работающие, как и все прочие алгоритмы, в автоматическом режиме.

В данной статье предлагается опытная методика оценки и прогнозирования состояния ГТП в процессе наработки взамен серийной методики.

Оценка состояния ГТП по серийной методике проводится в следующей последовательности:

- приведение контролируемых параметров к стандартным атмосферным условиям;
- графическое представление динамики изменения параметров с указанием ограничений;
- определение отклонений значений контролируемых параметров от исходных значений.

Опытная методика оценки состояния включает следующие этапы:

- 1) приведение термогазодинамических параметров ГТП к стандартным атмосферным условиям с учётом влияния на параметры отборов воздуха, атмосферных условий и других факторов;
- 2) построение диагностических моделей ГТП;
- 3) выделение трендов отклонений по статистическим критериям Хальда и Кокса – Стьюарта;
- 4) прогнозирование параметров ГТП с применением методов скользящего среднего, квазислучайного числа, переменного множителя, Холта, полинома 2-й степени, графического, адаптивного и др.

Метод скользящего среднего учитывает старение данных. Прогнозируемое значение на будущий период находят как среднее значение от предшествующих величин, за несколько прошлых периодов эксплуатации. Для каждого ГТП обосновывается предшествующий период эксплуатации.

Метод квазислучайных чисел основан на идее случайности значения параметра за период. Это отражает факт колебаний значения параметра в данный период. В то же время на практике доминирует представление о том, что случайные колебания могут происходить в некотором интервале значений между минимальной и максимальной величиной.

Графический прогноз основан на построении с помощью графика значений параметра и добавлении к нему линии тренда. Данные аппроксимируют линейной зависимостью.

Метод переменного множителя основан на вычислении множителя, прогнозное значение на следующий период получают путем умножения реальных данных за  $i$ -й период на множитель.

В методе Холта в начале для каждого периода (временного интервала) выделяют трендовую составляющую. Прогноз на  $k$  периодов вперед выполняют по формуле:

$$\bar{y}_{n+k} = y_n + kT_n,$$

где  $T_n$  – трендовая составляющая,  $y_n$  – фактическое значение параметра предыдущего периода,  $\bar{y}_{n+k}$  – прогнозное значение параметра на  $k$  периодов вперед;

5) анализ результатов и принятие решения по дальнейшей эксплуатации ГТП.

Сравнительная оценка эффективности используемых методов прогнозирования состояния ГТП проводилась по средней абсолютной процентной ошибке [4]:

$$\varepsilon = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \right) 100\%,$$

где  $e_i = \bar{y}_i - y_i$  – ошибка прогнозирования;  $\bar{y}_i$  – прогнозное значение параметра на  $i$ -й период;  $y_i$  – фактическое значение параметра.

Трендовый анализ ГТП включает более 30 контролируемых параметров, среди них обороты компрессоров низкого и высокого давления ( $n_1, n_2$ ), атмосферное давление, температура воздуха на входе в компрессор, температура газа на выходе из турбины, давление за КНД, температуры масла на различных участках и т.д. При этом оценка проводится как по одиночным, так и по комплексным параметрам, включающим одиночные [5].

Прогнозирование проводилось для трёх газотурбинных приводов.

В качестве примера в табл. 1–4 приведены результаты эффективности прогнозирования трёх параметров (температуры масла на выходе из привода ( $T_m$ ), давления масла на входе в привод ( $P_m$ ) и комплексного параметра, включающего давление масла в маслобаке привода, давление и температуру воздуха на входе в ГТП и частоту вращения ротора низкого давления ( $P_{мб}/P_v^*$ ). На рис. 2–4 приведены графики изменения прогнозных значений перечисленных параметров.

Таблица 1  
Среднее абсолютное отклонение  $T_m$

Метод прогноза	№ двигателя		
	1	2	3
Скользящее среднее	3,0052	5,132	1,3684
Квазислучайное число	5,5000	1,726	5,9000
Переменного множителя	4,5267	7,934	2,5478
Холта	0,0592	0,074	0,0003
Полином 2-й степени	2,9176	7,320	1,9895
Графический	6,4610	7,802	2,4852

Таблица 2  
Среднее абсолютное отклонение  $P_m$

Метод прогноза	№ двигателя		
	1	2	3
Скользящее среднее	0,0428	0,0238	0,0333
Квазислучайное число	0,1700	0,0200	0,3600
Переменного множителя	0,0386	0,0312	0,0440
Холта	0,0005	0,0008	0,0004
Полином 2-й степени	0,0462	0,0934	0,0684
Графический	0,0550	0,0296	0,0420

Таблица 3  
Среднее абсолютное отклонение  $P_{мб}/P_v^*$

Метод прогноза	№ двигателя	
	1	2
Скользящее среднее	0,00011	0,0016
Квазислучайное число	0,0272	0,0003
Переменного множителя	0,00006	0,0747
Холта	0,000001	0,00002
Полином 2-й степени	0,0001	0,0044
Графический	0,0273	0,0258
Адаптивный	0,000026	0,0069

Таблица 4  
Среднее абсолютное отклонение  $\varepsilon$

Метод прогноза	№ двигателя		
	1	2	3
Скользящее среднее	0,0106	0,0071	0,0054
Квазислучайное число	0,0220	0,0834	0,0311
Переменного множителя	0,0141	0,0124	0,0136
Холта	0,0002	0,0001	0,0001
Полином 2-й степени	0,0253	0,0099	0,0103
Графический	0,0203	0,0121	0,0140

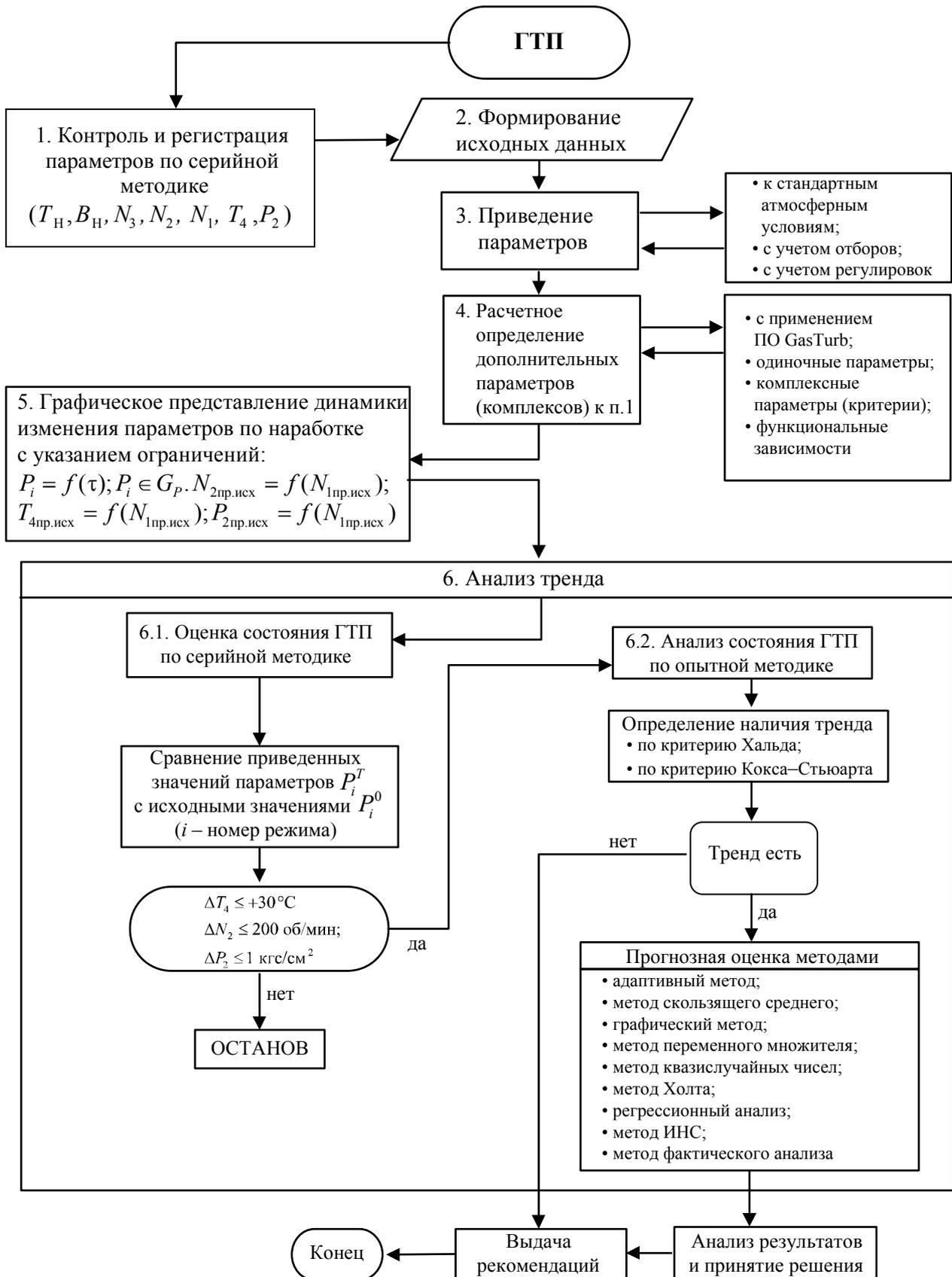


Рис. 1. Предлагаемый вариант структуры опытной методики оценки и прогнозирования состояния ГТП в процессе наработки

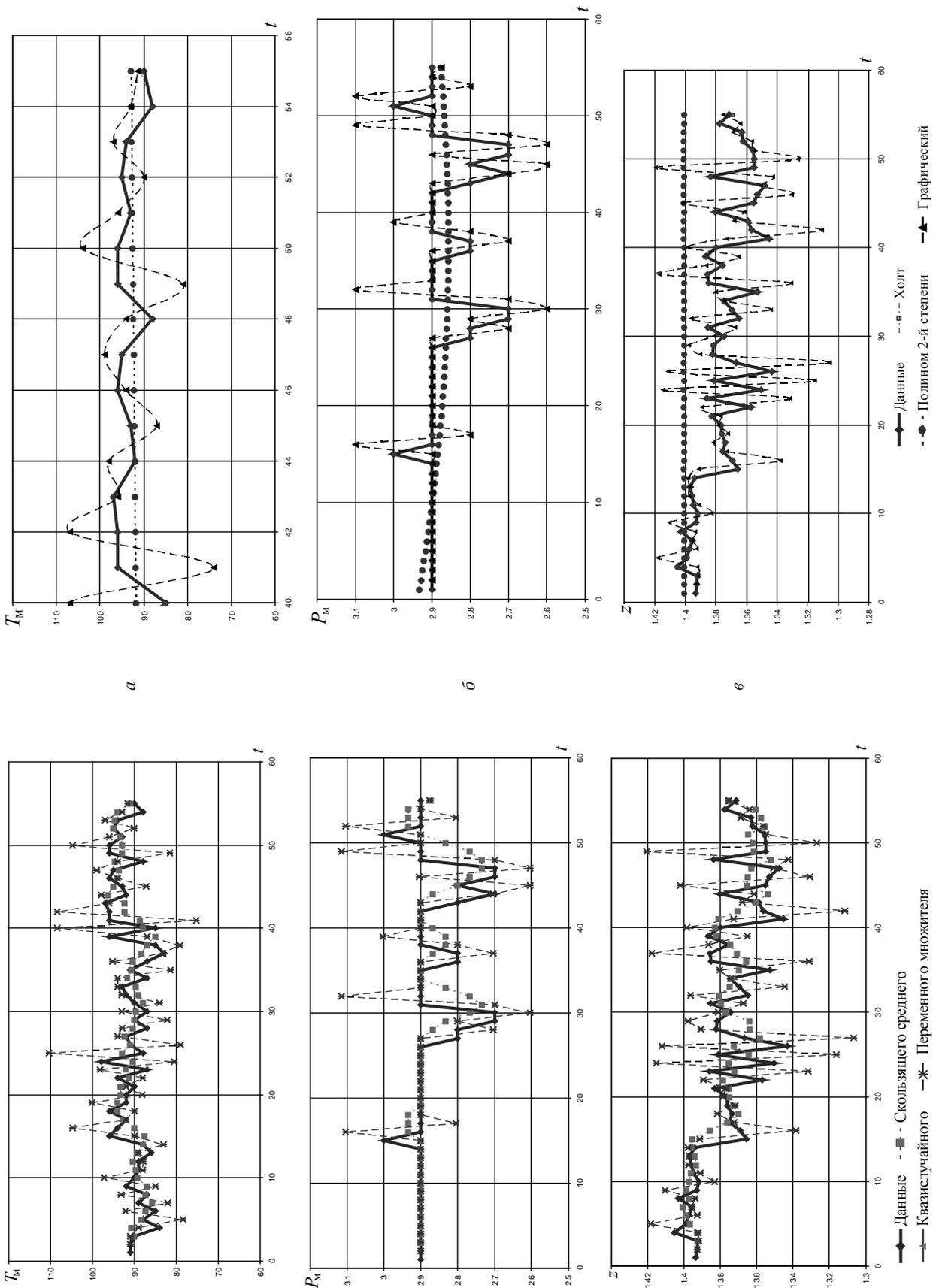
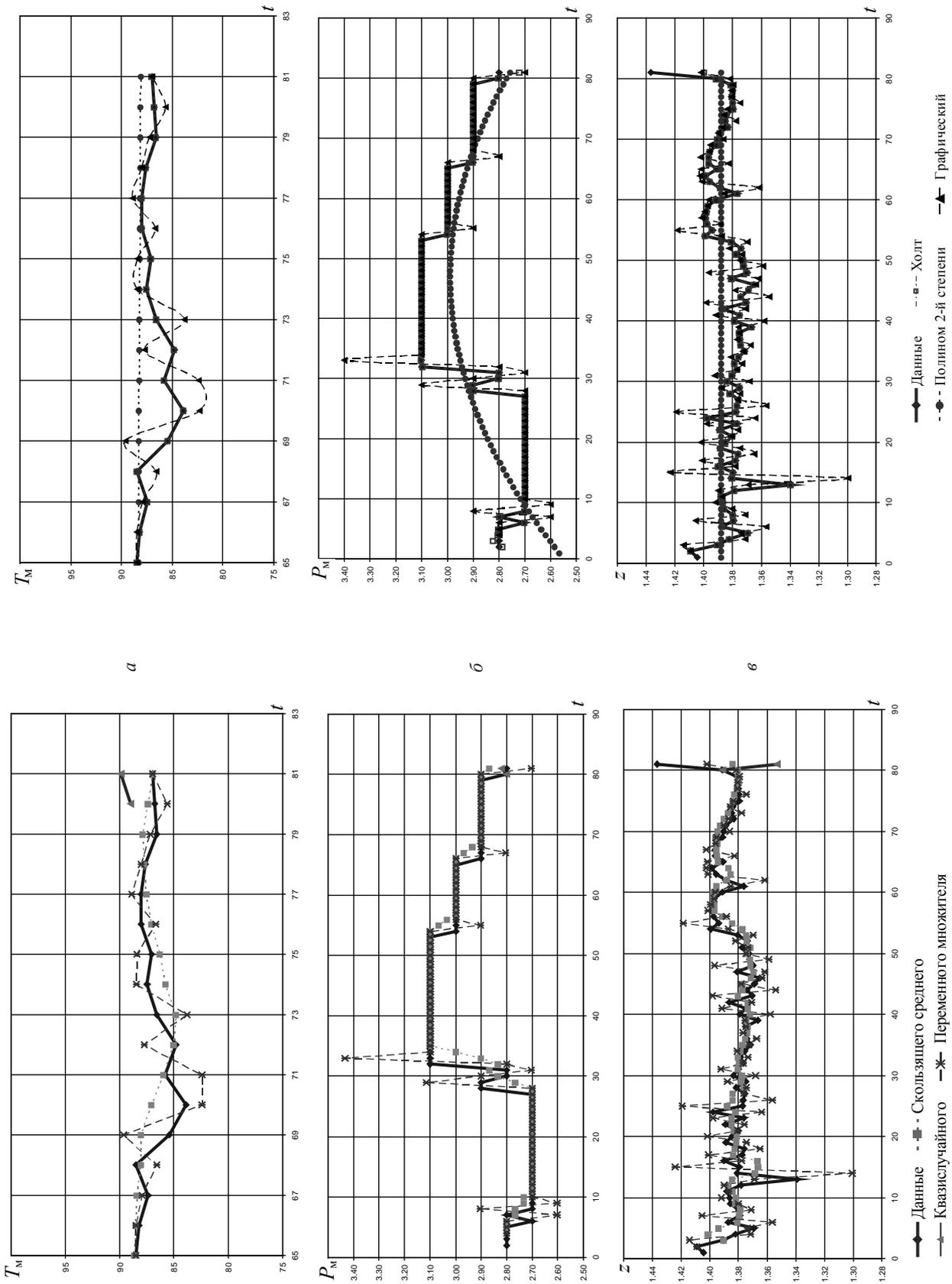


Рис. 2. Изменения прогнозных значений контролируемых параметров привода ГПП №1:

а – температура масла на выходе  $T_M$ ; б – давление масла на входе в привод  $P_M$ ; в – скольжение роторов  $z$ .



**Рис. 3.** Изменения прогнозных значений контролируемых параметров привода ГТП №2: а – температура масла на выходе  $T_M$ ; б – давление масла на входе в привод  $P_M$ ; в – скольжение роторов  $z$

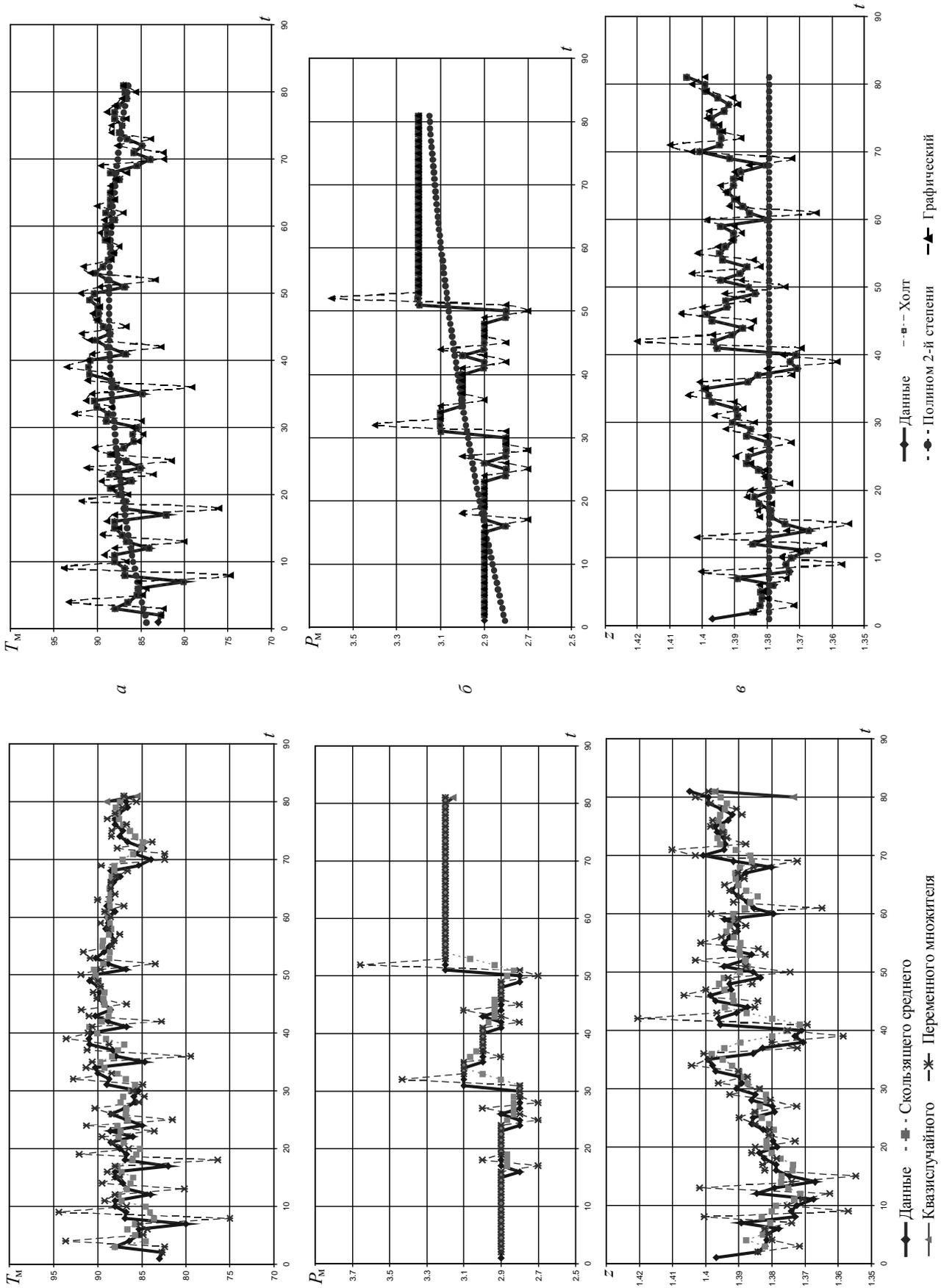


Рис. 4. Изменения прогнозных значений контролируемых параметров привода ГТП №3:

а – температура масла на выходе  $T_M$ ; б – давление масла на входе в привод  $P_M$ ; в – скольжение роторов  $z$

Как видно из таблиц, по величине средней абсолютной процентной ошибки для всех трёх приводов и рассматриваемых параметров наиболее эффективным является метод Холта. Значения показателя  $\varepsilon$  в методе Холта меньше, чем в других методах как минимум на два порядка. Следующим по эффективности является метод скользящего среднего. Сравнивая метод Холта с методом скользящего среднего, можно отметить, что в методе Холта значение  $\varepsilon$  в ~60 раз меньше, чем в методе скользящего среднего. Таким образом, можно констатировать, что прогнозные значения, полученные методом Холта, с высокой точностью описывают изменения контролируемых параметров ГТП. Во многом это объясняется тем, что в методе выделяется трендовая составляющая для каждого периода, которую дополняют к сглаживаемым данным, поэтому они достаточно близки к исходным. Недостатком метода является сдвиг прогнозной кривой только на один период в будущее.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бикчетай Р., Ванчин А.** Диагностика технического состояния газотурбинных приводов ГПА // Газотурбинные технологии. №6, ноябрь-декабрь 2003.
2. **Кильдинов Г. С., Френкель А. А.** Анализ временных рядов и прогнозирование. М.: Статистика, 1973. 432 с.
3. **Льюис К. Д.** Методы прогнозирования экономических показателей / пер. с англ. Демиденко Е.З. М.: Финансы и статистика, 1986. 132 с.
4. **Тихонов Э. Е.** Методы прогнозирования в условиях рынка: учеб. пособие / Северокавказский гос. техн. ун-т. Невинномысск, 2006. 221 с.
5. Теория прогнозирования и принятия решений: учеб. пособие / под ред. С. А. Саркисяна М.: Высш. школа, 1977. 351 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Гишваров Анас Саидович**, проф., зав. каф. авиац. двигателей. Инженер-механик по авиац. двигателям (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепловым двигателям летательных аппаратов (УГАТУ, 1993). Заслуженный деятель науки Республики Башкортостан. Теоретические и экспериментальные иссл. в области надежности, ресурса и испытания технических систем.

**Фатыхова Анвария Раисовна**. Аспирант той же каф. Магистр техники и технологии по специальности авиа- и ракетостроение (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. обеспечения надежности эксплуатации энергетических установок с газотурбинным приводом.