

ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА БАЗЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ И ТОЧЕЧНЫХ ДАТЧИКОВ

П.В. Гайский

Морской гидрофизический институт
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: gaysky@inbox.ru

В статье описываются функциональные возможности и реализованные алгоритмы созданной диалоговой программной модели для сравнительного анализа измерений пространственного профиля температуры с помощью распределенных и гирляндой точечных датчиков. Проводится предварительное моделирование.

Введение. Для объективного контроля быстроменяющихся во времени пространственных характеристик сред требуется создание измерительной сети датчиков, позволяющей одновременно регистрировать и восстанавливать поля и профили физических параметров. В частности, для контроля полей и профилей температуры могут альтернативно использоваться как точечные измерители (датчики), так и распределенные. Для определенного круга задач приоритетность их использования может быть решена путем проведения трудозатратного натурального экспериментального сравнительного анализа или путем программного моделирования с учетом знаний технических и метрологических характеристик измерителей, а также общих знаний об изменчивости контролируемого параметра.

Основная часть. В мировой практике известны оптоволоконные и проводниковые распределенные датчики. Наиболее востребованными и технически реализуемыми с точки зрения гидрофизических и метеорологических параметров на данный момент являются непрерывные во времени пространственные измерения профилей температуры. Опыт разработки и эксплуатации подобных измерителей на базе точечных и распре-

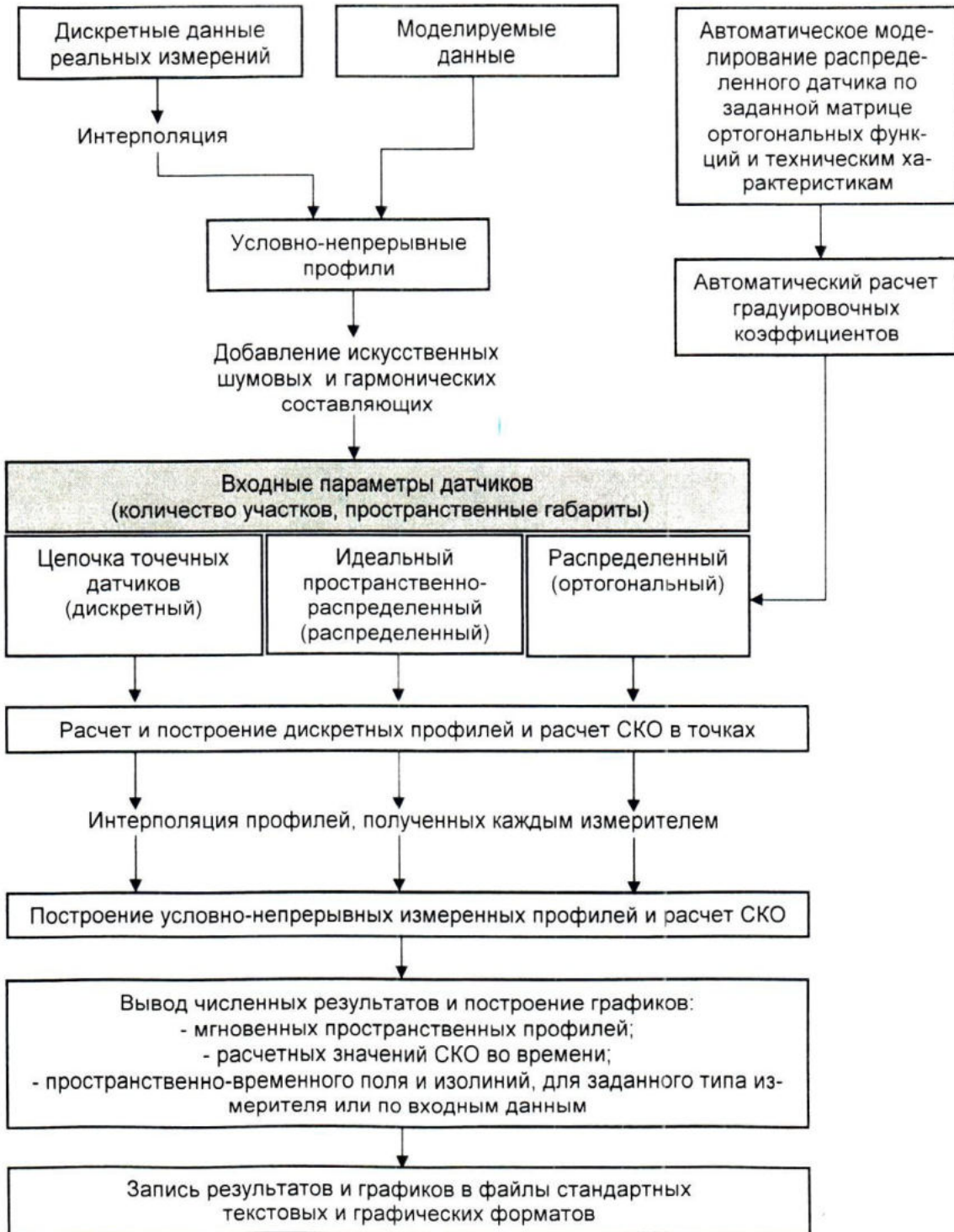
деленных датчиков [1–6] был положен в создание диалоговой программной модели, общий вид блок-схемы которой представлен на рис. 1.

На входе модели задаются технические (пространственное разрешение) и метрологические характеристики (случайные и систематические погрешности) измерителей трех типов: цепочка точечных дискретных датчиков, идеальный пространственно-распределенный на участках датчик и распределенный датчик, построенный на базе проводников, уложенных по ортогональным функциям (далее – дискретный, распределенный и ортогональный соответственно). В качестве исходного профиля температуры среды может быть взят искусственный моделируемый на базе математических функций, гармонических и шумовых составляющих или реальный из текстового файла данных. Причем в последнем случае автоматически осуществляется интерполяция дискретного в пространстве мгновенного профиля в условно непрерывный с возможностью искусственного наложения дополнительных гармонических и шумовых составляющих. Поскольку за основную задачу моделирования принималось проведение сравнительных оценок СКО восстановления исходного мгновенного пространственного профиля без учета динамических составляющих процесса, то такие параметры как инерционность датчиков, моделирование временной изменчивости и др. пока в расчет не вводились. В качестве СКО рассчитывались отклонения измеренных профилей для каждого из датчиков отдельно для узловых дискретных точек профиля, теоретически соответствующих максимальной погрешности восстановления, и для условно непрерывных профилей, полученных путем интерполяции.

Опыт эксплуатации распределенных датчиков температуры показывает, что оперативное построение пространственно-временных полей и изолиний для измерений в реальном времени может быть осуществлено с достаточной объективностью из взаимонезависимых по времени (в расчетном плане) измерен-

ных мгновенных профилей (рис. 2). При этом возрастают требования к метрологическим характеристикам измерителя и методам интерполяции самого профиля. В данной программной модели реализованы на выбор следующие методы:

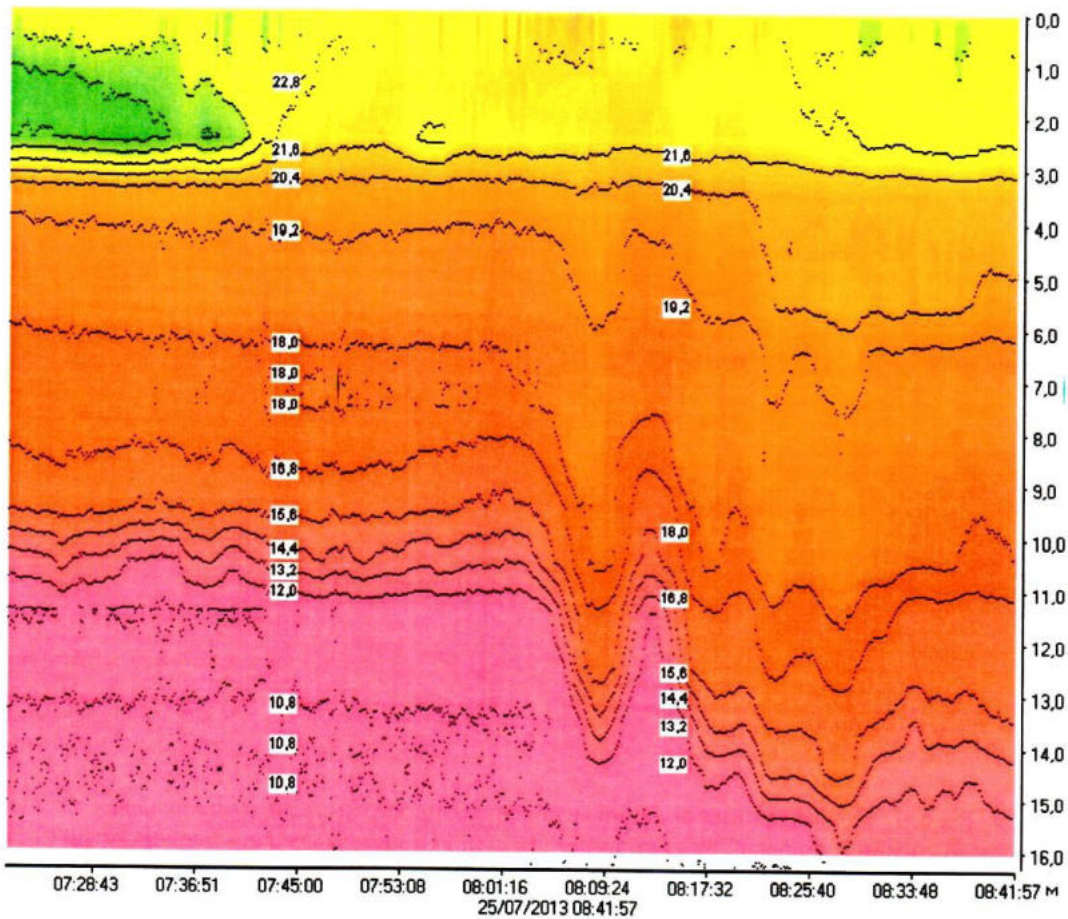
- сплайн;
- полиномиальная по всему профилю (степень полинома от 1 до 16);
- кусочно-полиномиальная;
- сплайн с коррекцией.



Р и с. 1. Обобщенная блок-схема программной модели

Наиболее точное (практически 100 %) попадание в исходные дискретные значения обеспечивает сплайн-интерполяция, однако есть существенный недостаток при восстановлении промежуточных значений, зачастую выраженный в виде малодостоверных экстремумов и выбросов. Для возможности их коррекции и при этом сохранении сплайновости была разработана про-

граммная процедура одновременного комбинирования сплайн со степенным и логарифмическим методами интерполяции. В результате проведенного анализа это решение показало наибольшую достоверность при восстановлении мгновенных профилей и далее использовалось как базовое при проведении моделирования и расчете оценочных характеристик (рис. 3).



Р и с. 2. Пространственно-временное поле и изолинии температуры, построенные в режиме реальных измерений путем сопоставления мгновенных пространственных профилей без временной интерполяции

Если в качестве исходного значения температуры на участке профиля принимается для дискретного датчика – центральное, а для распределенного – среднее на пространственном интервале, то для ортогонального оно вычисляется через градуировочные коэффициенты систем линейных уравнений и изменения сопротивлений проводников, укладка которых соответствует предваритель-

но заданной матрицей ортогональных функций (Уолша или др.), степенью модуляции, температурному коэффициенту сопротивления и вероятному значению инструментальной погрешности, которая в дальнейшем будет проявлять себя как систематическая (рис. 4).

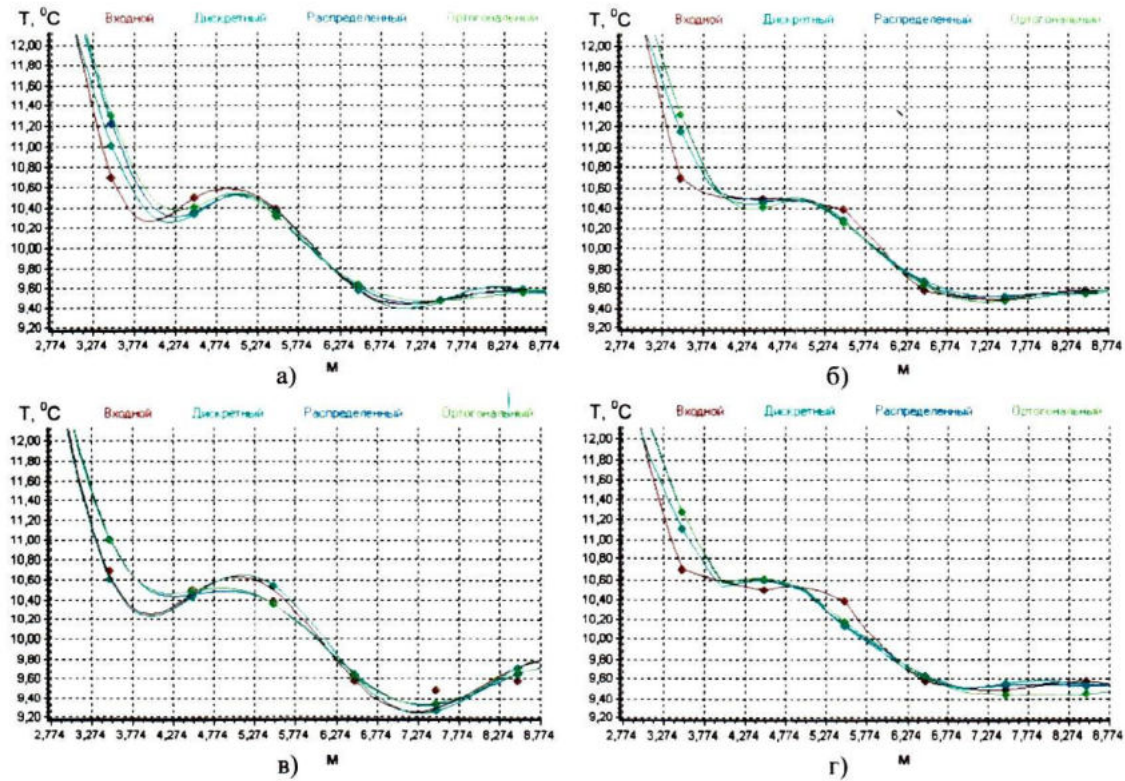
Функция наложения искусственных гармонических составляющих заданной амплитуды, частоты и фазы на входной

пространственный профиль, а также уровня шума (рис. 5), позволяет оценить индивидуальную устойчивость измерителей к изменчивости среды.

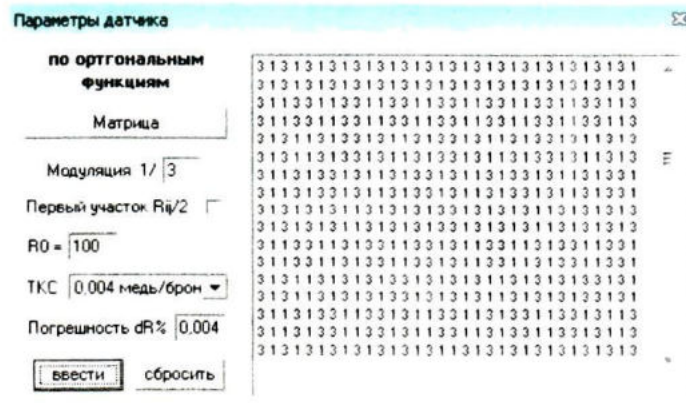
Пользовательские значения случайных погрешностей измерительных каналов оказывают неоднозначное влияние на результат рассматриваемых датчиков, поскольку различны для разного типа термозащитных элементов (например, цифровые

датчики имеют погрешности свыше $0,1^{\circ}\text{C}$, а проводниковые могут иметь менее $0,0001^{\circ}\text{C}$) и в случае с ортогональными датчиками оказывают непрямой алгоритмический эффект.

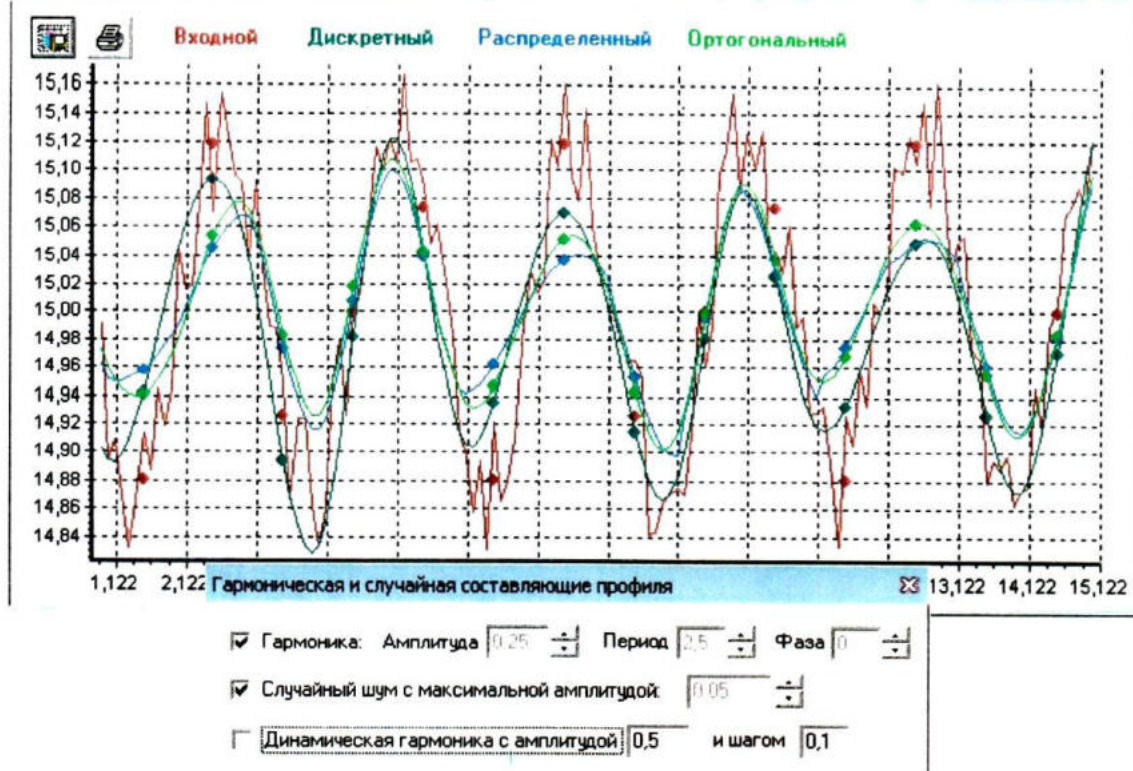
Общий вид пользовательского интерфейса программной модели и основные окна вывода численно-графических параметров и результатов отображены на рис. 6.



Р и с. 3. Примеры интерполяции мгновенных пространственных профилей: а) сплайн; б) сплайн с коррекцией; в) полином (16 ст.); г) полином кусочно-непрерывный (2 ст.)



Р и с. 4. Окно параметров моделирования распределенного датчика, построенного по ортогональным функциям



Р и с. 5. Окно настроек добавочных гармонических и случайных составляющих к входным данным пространственного профиля

Предварительное моделирование.

На базе реальной записи измерений 24-метрового вертикального профиля температуры часовой длительности (16 точек с интервалом 1,5 м) (рис. 7) проведем сравнительный анализ использования дискретного и распределенного датчиков. Поскольку предметом исследования будет только сама методика измерений, то систематические и случайные погрешности примем за нулевые. Соответственно при этом результаты идеального распределенного и ортогонального датчиков совпадут. Для интерполяции мгновенных пространственных профилей будем пользоваться кусочно-линейной интерполяцией первого порядка и сплайн-интерполяцией с коррекцией (см. выше). Примеры мгновенных профилей входных и выходных данных представлены на рис. 8. Графики временной изменчивости СКО восстановления профилей представлены на рис. 9 и 10. По численным и графическим результатам видно, что:

- 1) Суммарное СКО восстановления профиля при измерении дискретным датчиком меньше СКО при измерении распределенным;
- 2) Метод сплайн-интерполяции профиля с коррекцией обеспечивает уменьшение СКО приблизительно на 30 % для дискретного датчика и на 10 % для распределенного;
- 3) Восстановление дискретного профиля (без интерполяции) в граничных пространственных точках каждого участка осуществляется с максимальным значением СКО для каждого измерителя, и при этом оно практически совпадает.

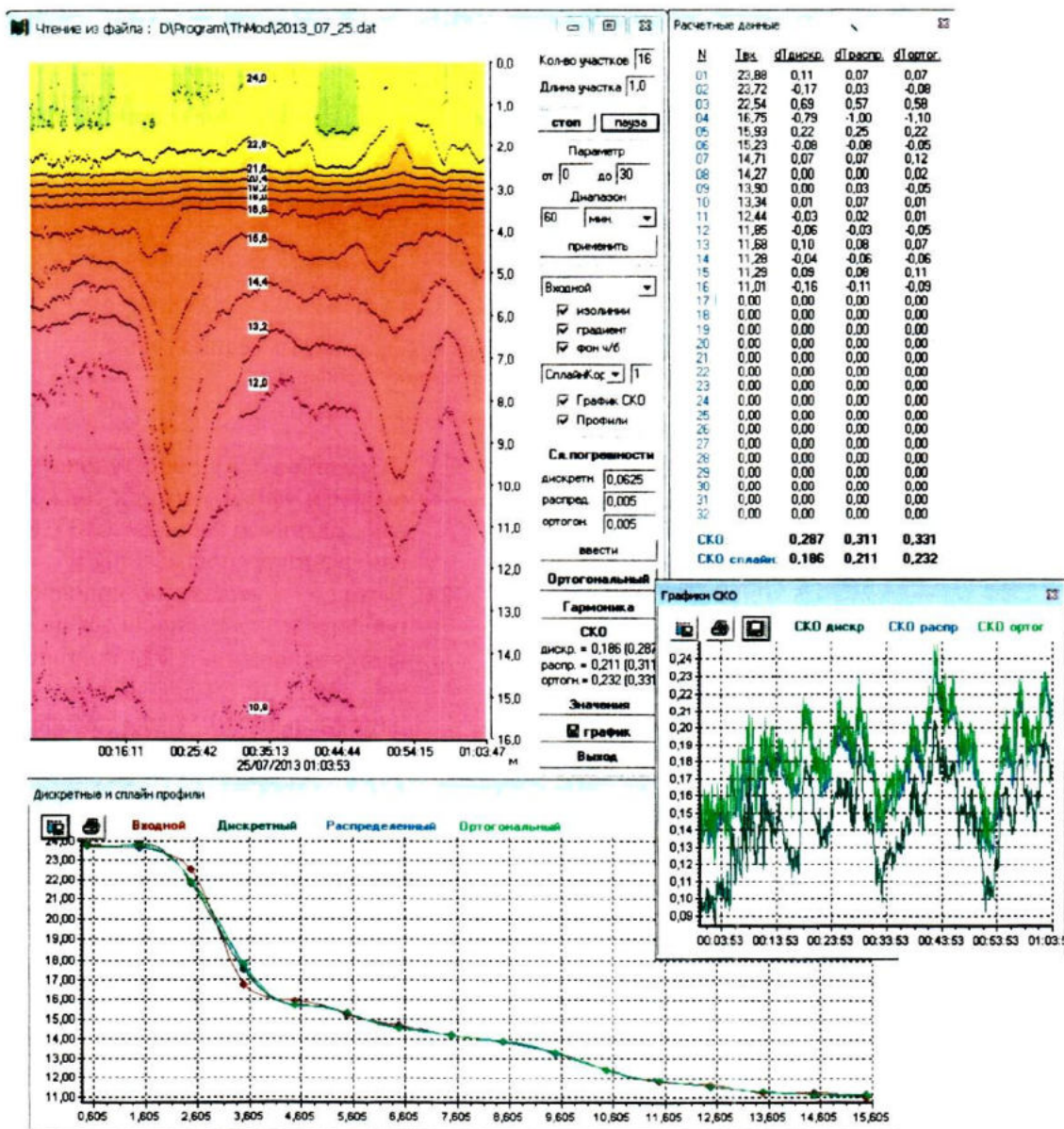
Результаты моделирования при введении близких к реальным случайных ($0,25^{\circ}\text{C}$ – дискретный цифровой, $0,02^{\circ}\text{C}$ – распределенный и ортогональный медные проводниковые) и систематической погрешности (0,004 % от сопротивления

– как инструментальной для ортогонального) для измерителей представлены на рис. 11 и 12.

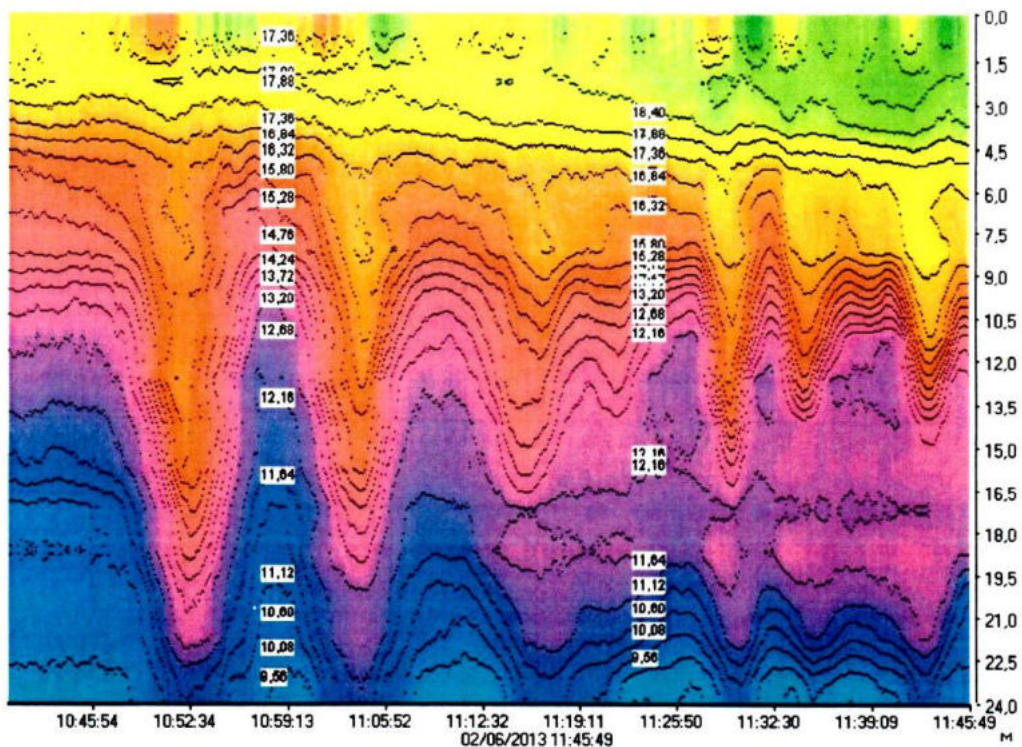
Рассмотрим СКО восстановления измерителями без метрологических погрешностей искусственного пространственного профиля, состоящего только из одинаковых гармонических составляющих (синусоида заданной амплитуды), но с динамически меняющимся (равномерно увеличивающимся) периодом колебаний (рис. 13). Динамика СКО

представляет собой спадающий по степенному закону график (рис. 14), который может быть основанием для формулировки требований к пространственной дискретизации (разрешению) датчиков измерителя, исходя из заданной изменчивости поля.

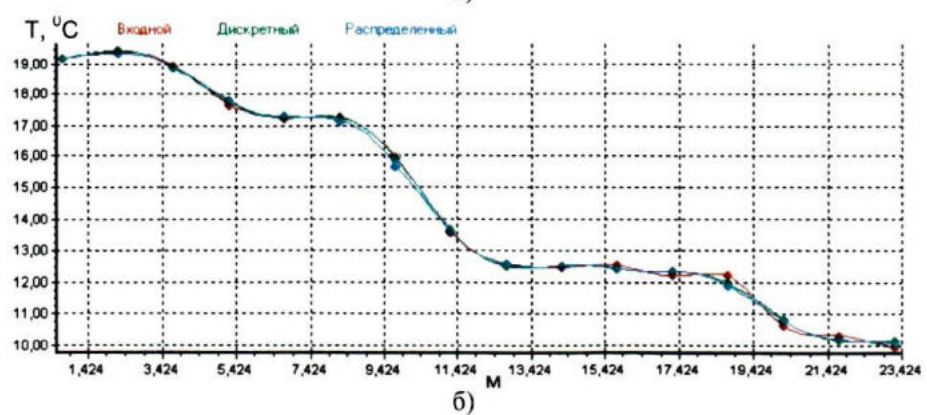
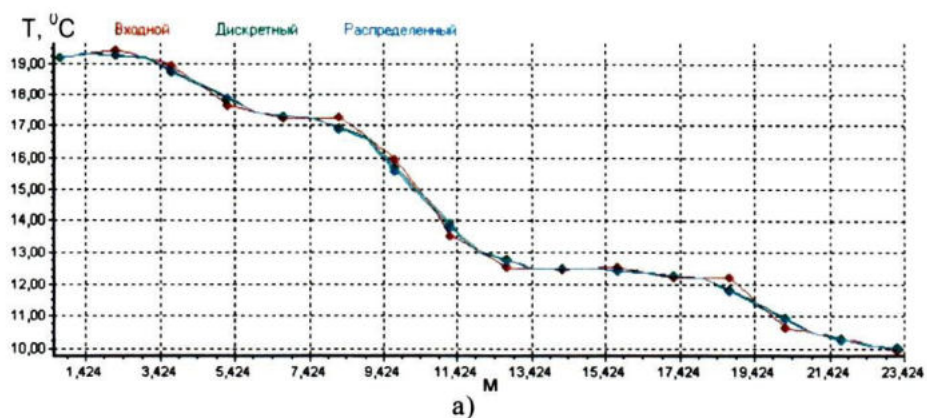
Для реальных измерителей с дополнительными шумами и гармоническими составляющими результаты моделирования могут выглядеть как на рис. 15.



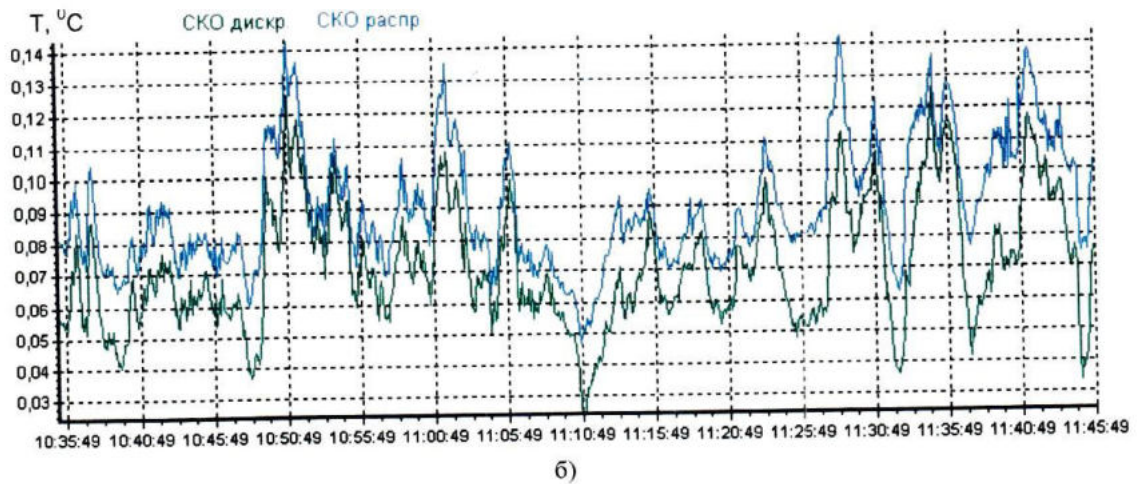
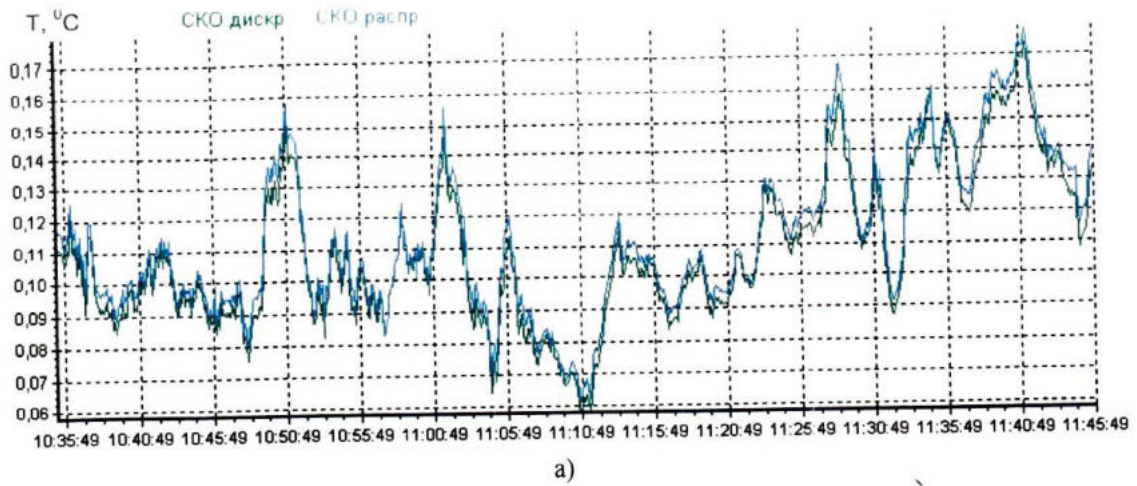
Р и с. 6. Общий вид пользовательского интерфейса программной модели



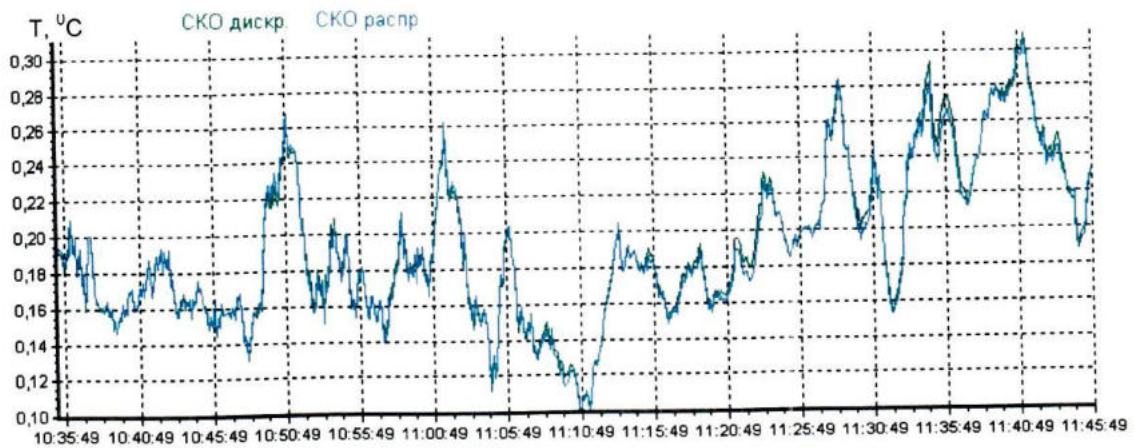
Р и с. 7. Реальная запись измерений 24-метрового вертикального профиля температуры часовой длительности на океанографической платформе



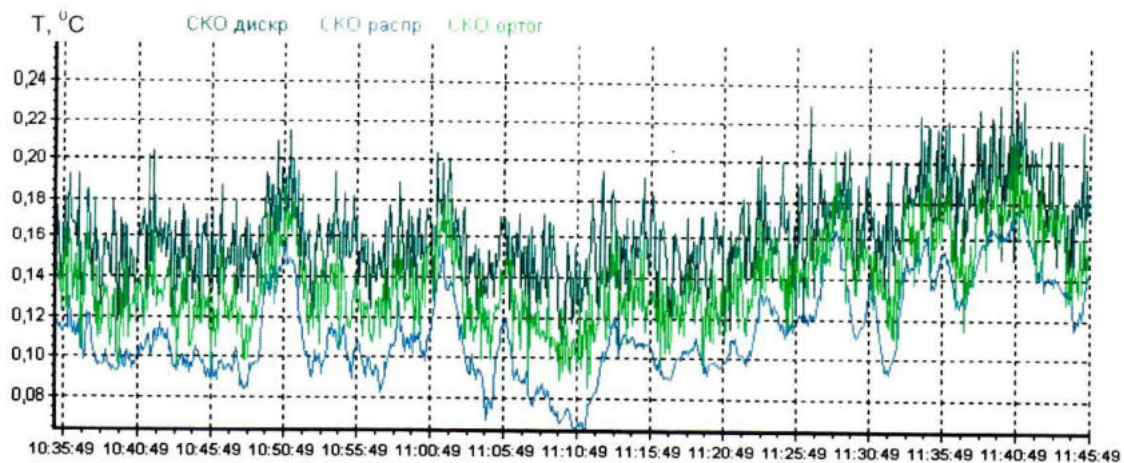
Р и с. 8. Примеры мгновенных профилей входных и выходных данных (идеальные измерители):
 а) интерполяция кусочно-линейным полиномом 1-го порядка;
 б) сплайн-интерполяция с коррекцией



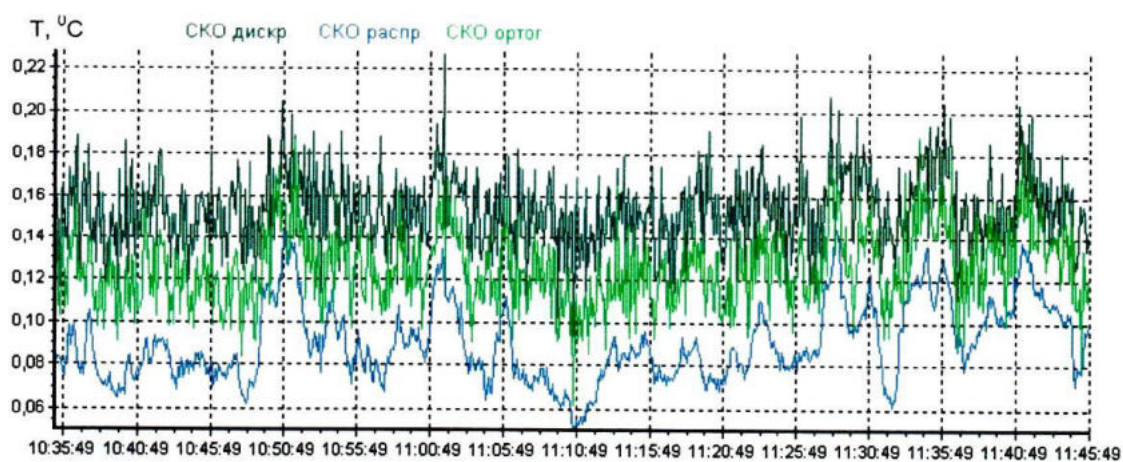
Р и с. 9. Графики временной изменчивости СКО восстановления интерполированных профилей (идеальные измерители) при использовании:
 а) интерполяции кусочно-линейным полиномом 1-го порядка;
 б) сплайн-интерполяции с коррекцией



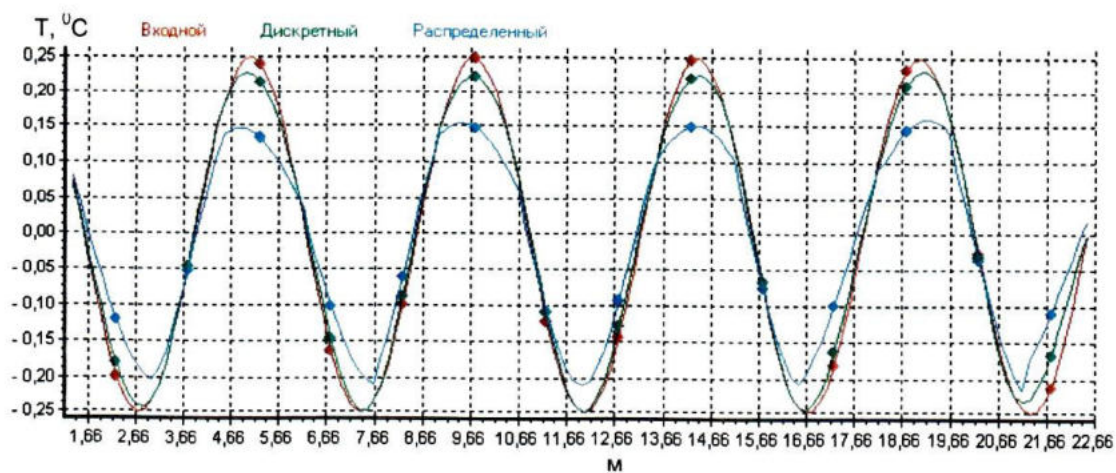
Р и с. 10. Графики временной изменчивости СКО восстановления дискретных профилей в точках, локально пространственно максимально удаленных от центра участка измерителя (условно максимальное СКО)



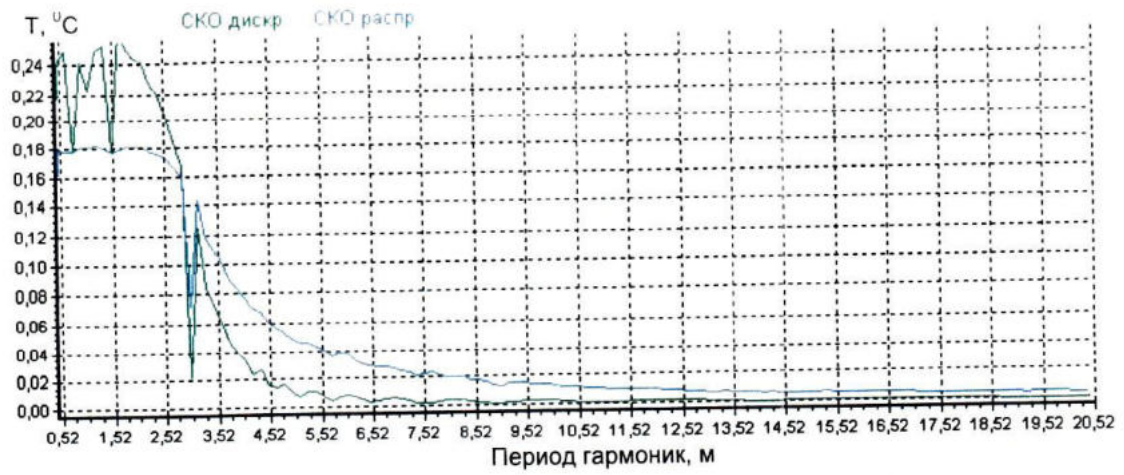
Р и с. 11. Графики временной изменчивости СКО восстановления интерполированных (кусочно-линейным полиномом 1-го порядка) профилей для реальных измерителей



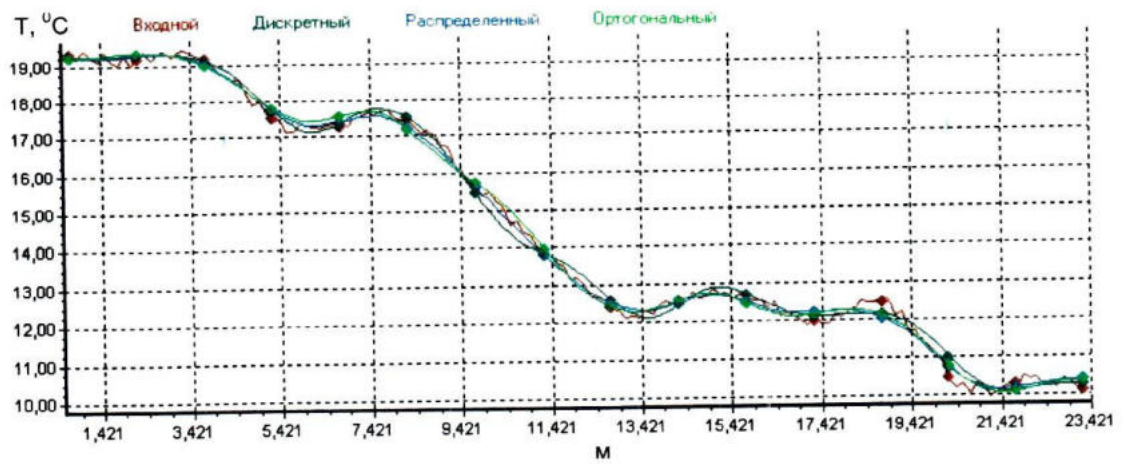
Р и с. 12. Графики временной изменчивости СКО восстановления интерполированных (сплайн с коррекцией) профилей для реальных измерителей



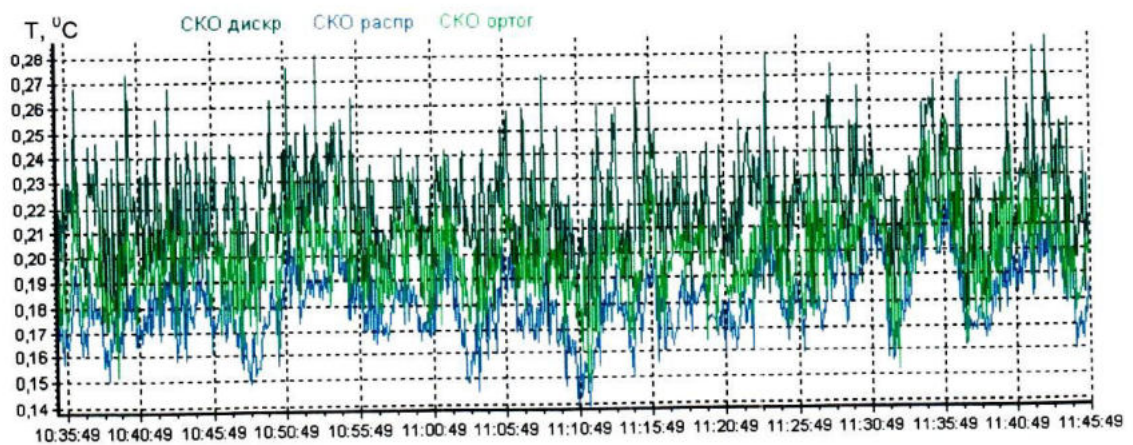
Р и с. 13. Восстановление пространственных профилей гармонических составляющих



Р и с. 14. Зависимость SKO восстановления синусоидальных профилей при изменении периода гармонических составляющих



а)



б)

Р и с. 15. Пример результатов комплексного моделирования: а) восстановление пространственных профилей; б) SKO восстановления

Заключение. В результате работы создана диалоговая программная система, моделирующая измерения пространственных профилей температуры с помощью гирлянды точечных и распределенных датчиков. Она позволяет предварительно оценить необходимые требования к измерителям для заданных условий эксплуатации, а также определить методику измерений. Модель может быть дополнена в дальнейшем новыми функциями с целью достижения наибольшей универсальности и расширения возможностей исследований. Проведенный предварительный сравнительный анализ для точечных и распределенных датчиков в области контроля профилей температуры показал, что их приоритетность применения в тех или иных условиях должна определяться индивидуально. Распределенные датчики сглаживают профиль, устраняя как полезные так и шумовые высокочастотные составляющие. Поскольку создание идеального распределенного измерителя технически пока невозможно, его место занимает распределенный ортогональный, на который накладывается ряд достаточно серьезных требований к инструментальной погрешности. Гирлянда точечных датчиков обеспечивает более достоверное локальное измерение, но из-за своей дискретности в пространстве не обнаруживает промежуточные гармоники, а случайный шум измерительного канала или сигнала напрямую вкладывается в результирующую погрешность.

Для конкретного случая моделирования измерений входящего реального вертикального профиля температуры воды на океанографической платформе в различные сезонные периоды 24 метровыми измерителями разрешением в 1,5 метра равноценное СКО обеспечивается при метрологической погрешности $0,2^{\circ}\text{C}$ для каждого из 16 точечных дискретных датчиков и $0,02^{\circ}\text{C}$ для участка распределенного датчика. С точки зрения общей технической реализации эти требования удовлетворимы при использовании в качестве дискретных – существующих серийных цифровых датчиков с наилучшими характеристиками и рас-

пределенных – из медных проводников типа ПЭТВ, подключенных через 16-ти разрядный АЦП. Для полной же оценки должны быть учтены динамические характеристики и надежность измерительных каналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гайский В.А., Гайский П.В.* Оценка необходимых интервалов пространственно-временной дискретизации и качества баз данных по окружающей среде // Раздел монографии: “Концепция построения автоматизированной системы экологического контроля вод Украины”, – Севастополь. – 1997. – С.107–121.
2. *Гайский В.А., Гайский П.В.* Распределенные термопрофилемеры и их возможности в океанографических исследованиях // Морской гидрофизический журнал. – 1996. – № 6. – С. 46–76.
3. *Гайский П.В.* Алгоритмически-программное обеспечение расчета коэффициентов градуировочных характеристик измерительных каналов // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2004. – Выпуск 19. – С. 102–106.
4. *Гайский П.В.* Автоматизированные системы с распределенными термопрофилемерами // Вестник СевНТУ, Автоматизация процессов и управления, Сб.научных трудов, СевНТУ, Севастополь. – 2009. – № 95. – С. 24–28.
5. *Гайский П.В., Казанцева Т.В.* Высокоскоростной измеритель температуры // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2010. – Выпуск 13. – С. 27–29.
6. *Гайский В.А., Гайский П.В.* Распределено-модулированные антенные системы для измерения динамических профилей физических полей // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2013. – Выпуск 19. – С. 27–35.