

УДК 528.063

О ТЕСТИРОВАНИИ НИВЕЛИРНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДЕФОРМАЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Д.В. УСОВ

(Полоцкий государственный университет)

На всех этапах строительства зданий и сооружений требуется организация и выполнение геодезического контроля строительных работ. Однако после завершения строительного процесса большинство гражданских, промышленных, гидротехнических и других типов сооружений требуют осуществления геодезического мониторинга, в который входит и наблюдение за деформациями. Для невысоких и простых по конструкции инженерных объектов небольшими горизонтальными и вертикальными смещениями можно пренебречь. В свою очередь для конструктивно сложных и уникальных инженерно-архитектурных сооружений требуется технология геодезического мониторинга, которая определяла бы и учитывала деформации в процессе строительства и эксплуатации таких объектов. По этой причине осадки уникальных зданий и сооружений должны быть определены с высокой точностью и обработаны корректными и эффективными методами уравнивания. Благодаря современному геодезическому оборудованию высокие точности легко достигаются. Однако остается центральным вопрос о проектировании геодезических нивелирных сетей с целью определения вертикальных смещений и о выборе исходных пунктов для уравнивания таких сетей.

Введение. К настоящему времени область применения высокоточных геодезических измерений значительно расширилась. Широко такие измерения применяются при определении деформаций инженерных сооружений. Известно, что различного рода деформации могут возникать вследствие конструктивных особенностей сооружения, влияния природных и техногенных факторов на сооружение в целом или на его отдельные элементы. Поэтому при строительстве и эксплуатации различных сложных и уникальных инженерных сооружений определяют их осадки и горизонтальные смещения, что позволяет оценить состояние объекта, надежность проекта, качество выполнения работ, контролировать безопасность сооружения [1].

Как известно, для определения осадок сооружений необходимо выполнение целого комплекса мероприятий, в который входит построение нивелирных сетей различной конфигурации. Ключевым звеном в определении деформаций являются результаты повторных нивелирных измерений, называемых эпохами. В зависимости от решаемой задачи эпохи могут содержать месячные, трехмесячные, полугодовые и годовые циклы.

До недавнего времени производили уравнивание нивелирных сетей, используя превышения, полученные в каждой эпохе. Затем в каждой эпохе наблюдения вычисляли уравненные отметки пунктов. Разность уравненных отметок и характеризует осадку сооружений. Современный подход заключается в том, что за измеренные величины берут не превышения, а разности превышений между эпохами.

Преимущества этого подхода заключаются в следующем [2]:

1) вместо того чтобы уравнивать сеть дважды по эпохам, уравнивание по разностям выполняется один раз. Это обстоятельство не является решающим, поскольку само уравнивание сети, как правило, занимает мало машинного времени;

2) традиционно в середине прошлого столетия в обработку допускались несвободные нивелирные сети, что приводило к необходимости выбора стабильных и мобильных пунктов с целью назначения исходных для уравнивания реперов;

3) в настоящее время существует более пяти способов уравнивания геодезических сетей без исходных пунктов, что позволяет иметь более полную картину об осадках реперов, не различая их на стабильные и мобильные. Также, если брать в уравнивание разности эпох, начальные отметки исходных пунктов общеизвестны и они равны нулю, что позволяет давать однозначные решения при уравнивании;

4) после уравнивания разностей эпох в итоге получаем не уравненные отметки, а результаты самих деформаций;

5) без уравнивания разностей превышений трудно иным способом дать оценку точности как этих разностей, так и величину осадок. Оценка точности по результатам уравнивания характеризует точность измерений по разности эпох после уравнивания. Это обстоятельство является решающим в защиту уравнивания разностей эпох.

На сегодняшний день существуют различные методики и способы определения осадок и горизонтальных смещений, также существуют различные методы анализа измеренных величин, которые должны предшествовать уравниванию измерений. Результаты анализа используют для сравнения данных о за-

проектированной и фактической точности, для совершенствования методики наблюдений, выбора методов уравнивания, для определения фактических ошибок деформаций. В основном для предварительной приближенной оценки точности ограничиваются вычислением средних квадратических погрешностей измеренных величин. Но при высоких требованиях точности определения деформаций выполняют более детальный анализ с привлечением методов математической статистики: выявление грубых ошибок измерений по различным критериям, исследование вида распределения результатов измерений, исследование систематических ошибок и т.д.

Вышеизложенные вопросы анализа уже готовых осадочных сетей хорошо изучены и изложены в специальной литературе [3], но остается актуальным вопрос тестирования нивелирных геодезических сетей при определении деформаций инженерных сооружений на стадии проектирования. На данный момент отсутствует четкая и простая методика проектирования геодезических нивелирных сетей для определения осадок. Наиболее часто используют произвольные геодезические сети, с помощью которых невозможно выполнить определение осадок инженерных сооружений, что приводит к увеличению необходимого числа эпох наблюдений, к большому объему полевых и камеральных работ и, соответственно, к увеличению экономической стоимости работ.

В статье предлагается методика тестирования нивелирных геодезических сетей с применением персонального компьютера. Также даны сведения о программе, позволяющей определить пригодность конкретной нивелирной сети для определения осадок.

Теоретическая часть исследований нивелирных сетей на стадии проектирования, с целью определения осадок инженерных сооружений. На протяжении всего опыта исследований, опубликованных в [1, 3], полагают, что на тестируемых объектах может возникнуть одно из следующих условий:

- 1) осадок сооружений нет, есть только ошибки измерений;
- 2) осадки есть, но они соизмеримы с ошибками измерений;
- 3) осадки в z раз больше, чем ошибки измерений.

Тестирование нивелирных сетей на стадии проектирования выполнялось на ПК по отдельной программе по следующему алгоритму:

- 1) получаем разности эпох, генерируем разности превышений по датчику псевдослучайных чисел;
- 2) уравниваем нивелирную сеть и получаем уравненные значения осадок.

Уравнивание нивелирных сетей выполнялось без исходных пунктов двумя методами, которые позволяют уравнивать нуль-свободные геодезические нивелирные сети, привязывать их к исходным пунктам, получать уравненные высоты определяемых пунктов с точностью, соответствующей точности определения параметров.

Получение отметок (осадок) относительно средней плоскости методом В.Н. Ганьшина [2] реализовывалось по формулам:

$$F = G(S^T P S)^{-1} S^T P; \quad (1)$$

$$G_{t \times (t-1)} = \frac{1}{t} \begin{pmatrix} t-1 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & t-1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & -1 & t-1 & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & -1 & -1 & \dots & t-1 \\ -1 & -1 & -1 & \dots & -1 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$H^{cp} = -FL; \quad (3)$$

$$h^{yp} = AH^{yp}; \quad (4)$$

$$V = h^{yp} - h^{зм}, \quad (5)$$

где F – расширенная псевдообратная матрица; G – вспомогательная псевдообратная матрица, формируемая программой; S – матрица A без столбца для одного исходного пункта; A – матрица коэффициентов уравнений поправок; P – диагональная матрица весов измерений; L – вектор свободных членов уравнений поправок; H^{cp} – вектор уравненных значений отметок определяемых пунктов в условной системе отсчета; h^{yp} – вектор уравненных превышений; $h^{зм}$ – вектор измеренных превышений; V – вектор поправок в измеренные превышения.

Уравнивание сети без исходных пунктов новым способом с учетом координат исходных пунктов осуществлялось по формулам [4]:

$$\begin{aligned}
 H_j^{yp} &= \frac{\sum_{i=1}^n (H_j^{i-u})}{n}; \\
 (H^{i-u})_n^{yp} &= H^0 + \delta H_n; \\
 F_n &= (S_n^T P S_n)^{-1} S_n^T P; \\
 Q &= f P^{-1} f^T; \\
 f &= \frac{(H^{yp})_\delta - H^{yp}}{\delta},
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

где H^0 – предварительные отметки определяемых пунктов, найденные по неуровненным превышениям; Q – обратная матрица весов измерений; f – расширенная псевдообратная матрица, найденная численным методом.

Данные методы уравнивания позволили обрабатывать тестируемые нивелирные сети, не подразделяя пункты сети на стабильные и мобильные, и получать однозначные решения при уравнивании;

3) из уравненных значений осадок берем среднее арифметическое по эпохам. Независимо от способа уравнивания и выбранного условия предлагаем брать среднее арифметическое осадок их эпох. При этом если осадок нет, то среднее из эпох будет иметь прямолинейный график, начиная с критической эпохи. Разумеется, что промежуток времени между эпохами зависит от интенсивности оседания или выпучивания реперов. При наличии осадок сооружений после критической эпохи должно наблюдаться увеличение значений осадок инженерного объекта. Для пояснения этого предлагаем формулу:

$$L_{cp} = n_{cp} + \Delta_{cp}, \tag{7}$$

где L_{cp} – осадка сооружения средняя из эпох; n_{cp} – среднее из эпох значение осадок при их отсутствии; Δ_{cp} – систематическая составляющая, характеризующая осадки сооружений.

Заметим, что при увеличении числа эпох n_{cp} стремится к нулю, а Δ_{cp} характеризует осадку сооружения в среднем из эпох и как систематическая часть никогда не будет равна нулю при увеличении числа эпох. Отсюда видно, что с увеличением числа эпох

$$L_{cp} \rightarrow \Delta_{cp}.$$

Отметим, что обычно в обработку не брали L_{cp} из эпох для анализа осадок инженерных сооружений и тестирования нивелирных сетей.

Практическая часть тестирования нивелирных сетей на стадии проектирования с целью определения осадок инженерных сооружений. В процессе исследования были рассмотрены и протестированы три вида различных по конфигурации нивелирных геодезических сетей. На рисунках 1 – 3 представлены схемы этих сетей.

Данные нивелирные сети были протестированы по всем трем вышеуказанным условиям с использованием программы NIWA. Программа для своего функционирования требует следующую исходную информацию:

- значение стандарта σ в миллиметрах, согласно которому генерировались осадки реперов в каждой эпохе;
- равноточные или неравноточные измерения;
- степень для метода обработки ($n = 2$ для МНК);
- номер исходного пункта;
- номер эпохи наблюдений.

Информация об измеренных превышениях составляется, начиная с любого превышения, и должна содержать порядковый номер превышения, номер начального и конечного пунктов превышения. Величину превышений h задавать не требуется, так как программа может сама генерировать значения разностей превышений из датчика псевдослучайных чисел. Также не требуется задавать и вес измерений.

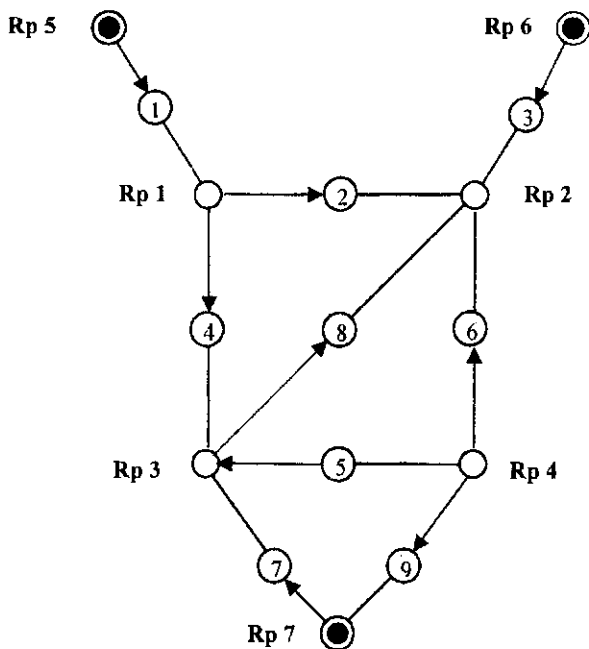


Рис. 1. Схема нивелирной сети

Источник: [5 с. 254]

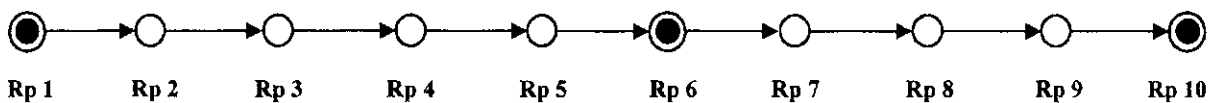


Рис. 2. Вытянутый нивелирный ход без узловых пунктов

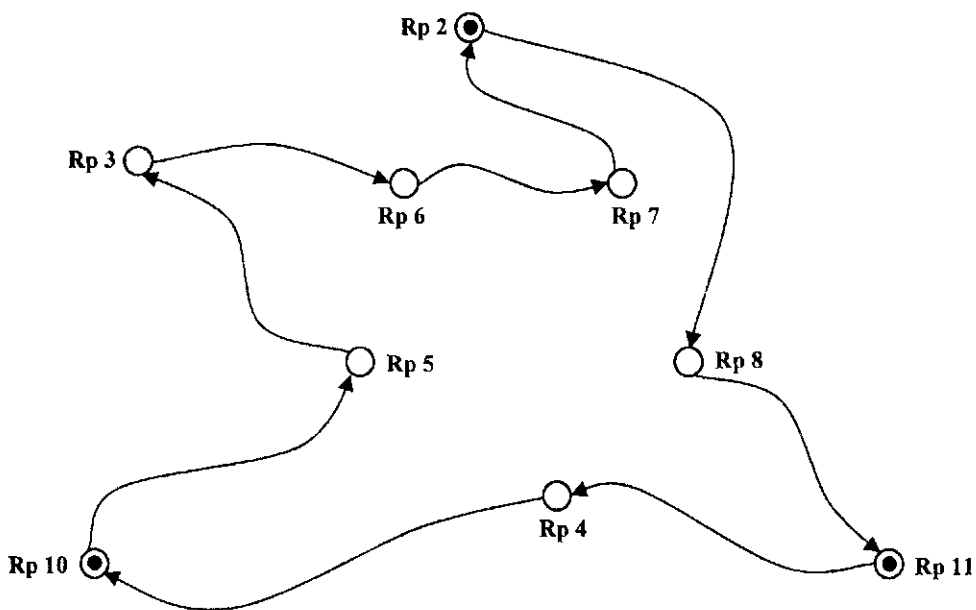


Рис. 3. Фрагмент нивелирной сети Национальной библиотеки Беларуси

Результаты тестирования нивелирных сетей представим в графическом виде (рис. 4 – 6).

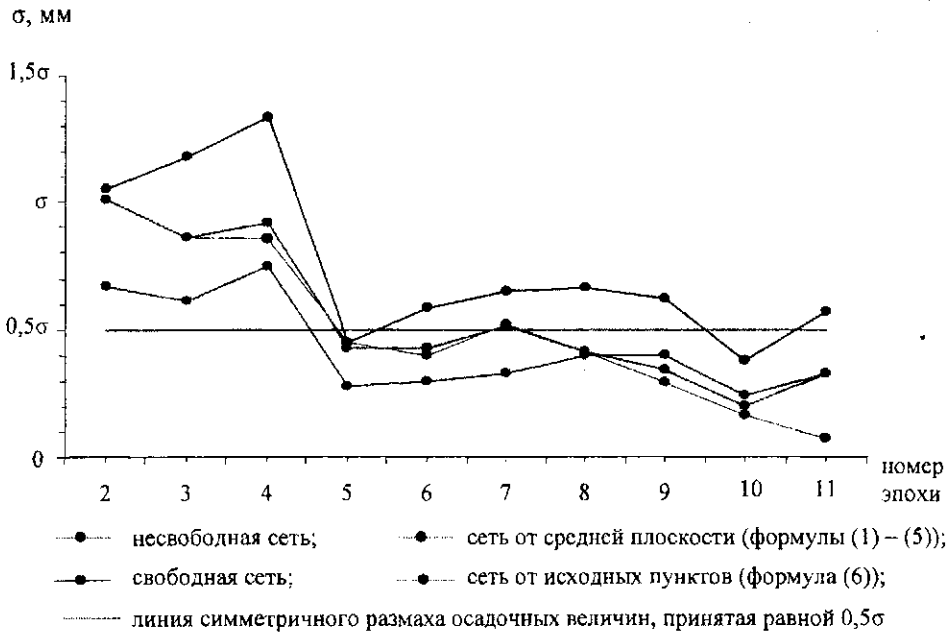


Рис. 4. Результаты тестирования нивелирной сети

Источник: [5 с. 254]

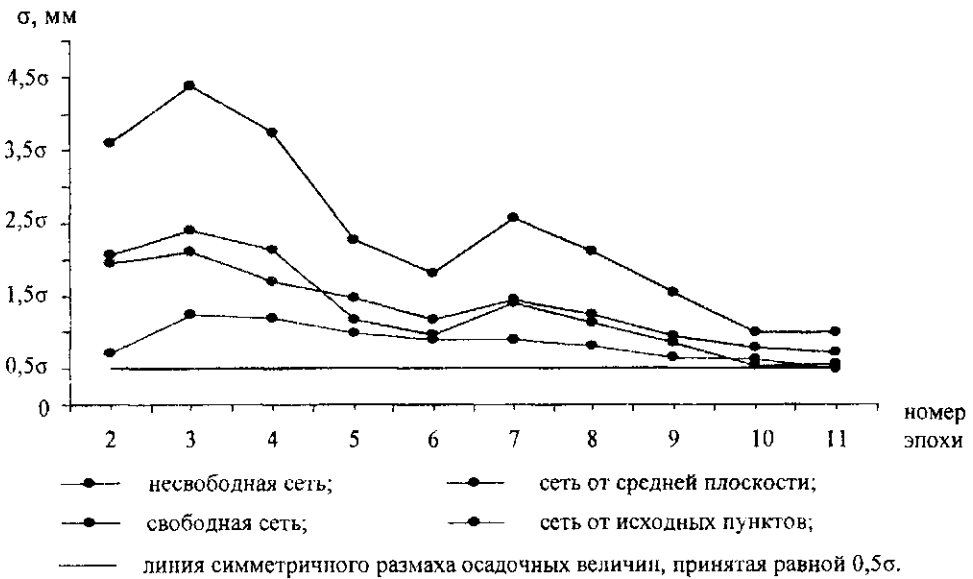


Рис. 5. Результаты тестирования вытянутого нивелирного хода

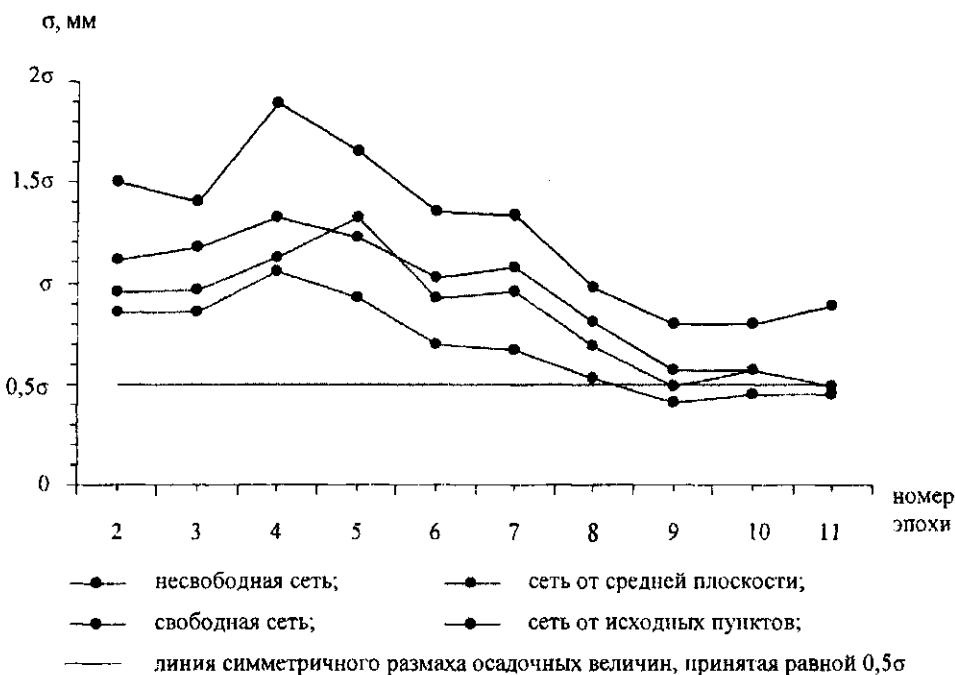


Рис. 6. Результаты тестирования нивелирной сети Национальной библиотеки Беларуси

Анализируя графики (рис. 4 – 6), построенные по результатам тестирования нивелирных сетей различной конфигурации, можно сделать следующие **выводы**.

1. Осадки реперов нельзя определять из обработки как свободных геодезических нивелирных сетей (опирающиеся на один исходный пункт), так и несвободных нивелирных сетей. В последнем случае для обеспечения необходимой и достаточной точности результатов наблюдений за осадками сооружений требуется проводить контроль за устойчивостью реперов высотной основы, так как результаты уравнивания нивелирных сетей зависят от расположения исходных реперов и их стабильности во времени. Это обстоятельство приводит к тому, что возникает необходимость в дополнительном нивелировании исходных пунктов высотной основы, а при математической обработке результатов наблюдений назначать стабильные и мобильные пункты.

2. Два способа уравнивания нуль-свободных нивелирных сетей – метод «относительно средней плоскости» и новый метод «относительно исходных пунктов» – дают близкие результаты деформаций и могут быть использованы на производстве как независимо, так и совместно. Но для определения осадок инженерных сооружений рекомендуется отдавать предпочтения первому методу математической обработки – методу В.Н. Ганьшина (формулы (1) – (6));

3. На рисунках 5 и 6 линии симметричного размаха осадочных величин располагаются ниже всех графиков, что говорит о непригодности тестируемых нивелирных сетей: вытянутого нивелирного хода без узловых пунктов (см. рис. 2) и нивелирной сети Национальной библиотеки Беларуси (см. рис. 3). Очевидна малая чувствительность осадок при переходе от эпохи с номером 2 к эпохе с номерами 11 и выше.

Для решения этой проблемы предлагаем усилить геометрию нивелирных сетей дополнительными построениями, как это показано на рисунках 7 и 8.

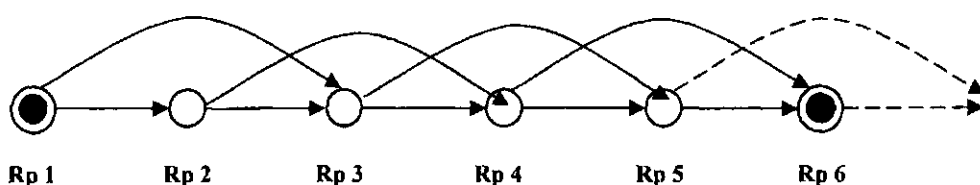


Рис. 7. Вытянутый нивелирный ход с дополнительными построениями

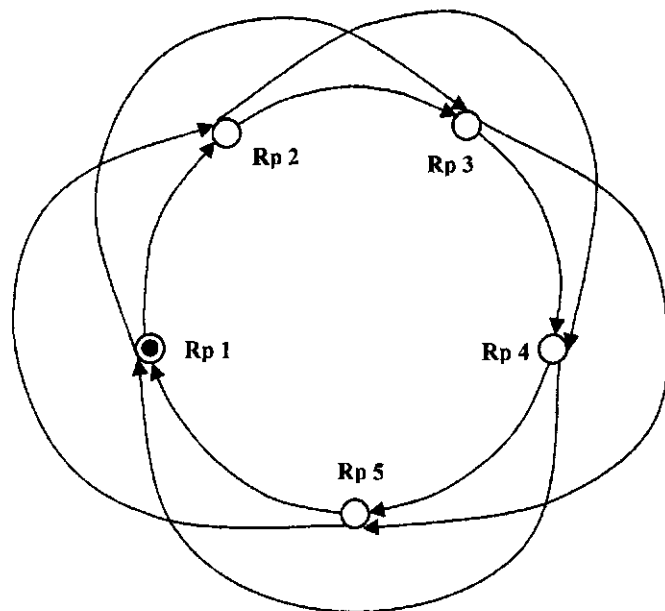


Рис. 8. Фрагмент нивелирной сети Национальной библиотеки с дополнительными построениями

Покажем на графиках (рис. 9) результаты математической обработки нивелирных сетей с дополнительными измерениями методом «относительно средней плоскости».

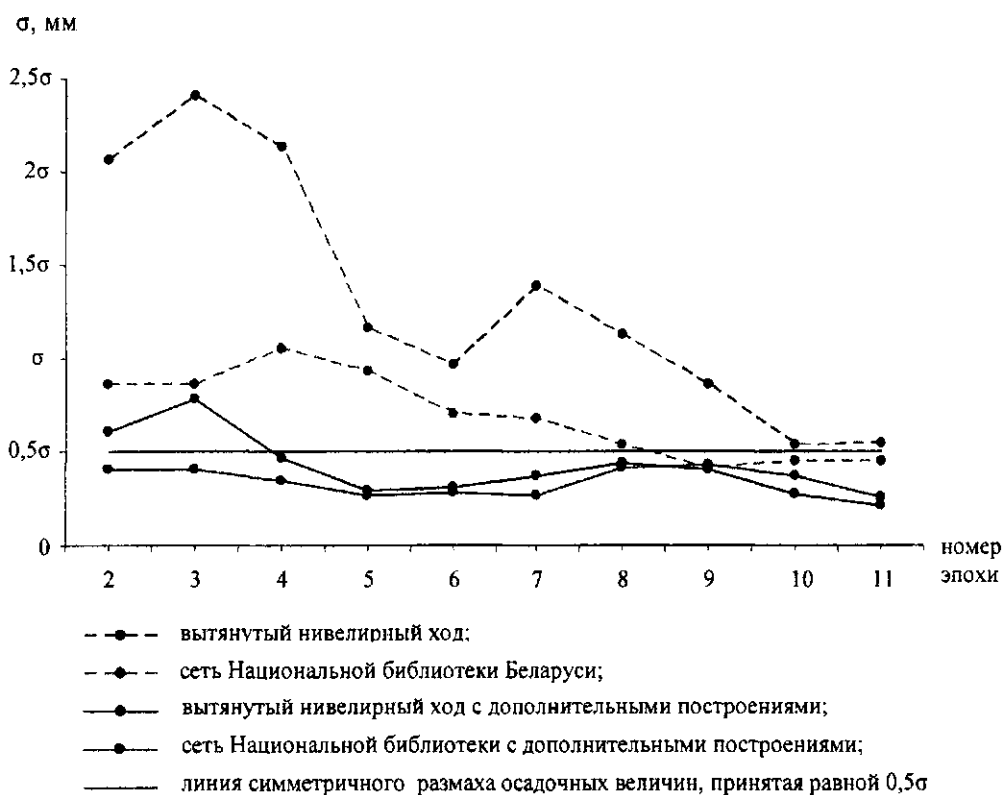


Рис. 9. Результирующие графики

По результатам тестирования нивелирных сетей с дополнительными построениями на стадии проектирования (рис. 9), с целью определения осадок инженерных сооружений можно сделать следующие выводы:

1) независимо от схемы нивелирной сети использование дополнительных построений (замыкающих) приводит к появлению избыточных измерений, которые в свою очередь улучшили надежность определения осадок в несколько раз;

2) при использовании нивелирных сетей с замыкающими для определения вертикальных смещений сооружений прогнозируемые осадки получаются в два раза меньше, по этой причине для достоверного определения осадок инженерных объектов потребуется в два раза меньше эпох наблюдений;

3) поскольку дополнительные измерения приводят к появлению замкнутых фигур, то по невязкам W , в них возникающих, и с применением формулы Ферреро можно найти среднюю квадратическую ошибку разностей превышений в каждой эпохе следующим путем:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k W_i^2}{3k}}, \quad (8)$$

где k – количество замкнутых фигур;

4) независимо от способа уравнивания и выбранного условия предлагаем брать за окончательный результат среднее арифметическое осадок их эпох, так как среднее арифметическое «уничтожает» случайные ошибки измерений, и в итоге получаем «чистые» осадки наблюдаемого инженерного объекта.

В заключение отметим, что необходимо выполнять обязательное тестирование осадочных нивелирных сетей на стадии проектирования по предложенной методике. Для определения осадок нельзя допускать нивелирные сети, показанные на рисунках 2 и 3, так как они характеризуют величину осадки выше линии симметричного размаха осадочных величин, которая равна $L = \sigma_n / 2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пискунов, М.Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений / М.Е. Пискунов. – М.: Недра, 1980. – 248 с.
2. Ганьшин, В.И. Измерение вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / В.И. Ганьшин, А.Ф. Стороженко, А.Г. Ильин. – М.: Недра, 1981. – 215 с.
3. Карлсон, А.А. Измерение деформаций гидротехнических сооружений / А.А. Карлсон. – М.: Недра, 1984. – 245 с.
4. Усов, Д.В. Методы уравнивания нивелирных сетей без исходных пунктов / Д.В. Усов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2006. – № 9. – С. 105 – 113.
5. Большаков, В.Д. Теория математической обработки геодезических измерений / В.Д. Большаков, П.А. Гайдаев. – М.: Недра, 1977. – 367 с.

Поступила 14.04.2008