

УДК 004:519.2

Сергей Викторович Иносов

Кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов

Владимир Михайлович Корниенко

Аспирант кафедры автоматизации технологических процессов

Вячеслав Валериевич Гречуха

Аспирант кафедры автоматизации технологических процессов

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АДАПТИВНОГО ЛИНЕЙНОГО СТАЦИОНАРНОГО ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО ФИЛЬТРА

Показано, что адаптивный прогнозатор числовых последовательностей на базе линейного стационарного цифрового фильтра, незважачи на простоту алгоритму, виявляє деякі ознаки «інтелектуальної» поведінки, що виявилось в результаті дослідження на тестових числових послідовностях.

Ключові слова: *числова послідовність, прогнозування, цифровий фільтр, лінійний, стаціонарний, адаптивний*

Показано, что адаптивный прогнозатор числовых последовательностей на базе линейного стационарного цифрового фильтра, несмотря на простоту алгоритма, проявляет некоторые признаки «интеллектуального» поведения, что показало исследование на тестовых числовых последовательностях.

Ключевые слова: *числовая последовательность, прогнозирование, цифровой фильтр, линейный, стационарный, адаптивный*

Adaptive predictor of numerical sequences, based on linear stationary digital filter, demonstrates some signs of "intelligent" behavior, despite the simplicity of the algorithm, which signs have been illustrated on test numerical sequences.

The numerical sequence which is subject to the forecast, turns out as a result of periodic selection and is being passed via the linear continuous time digital filter in real time. The received on an output value of the filter is the current forecast of the same sequence for a certain amount of clock periods forward.

Impulse responses of the filter are automatically set up by the unit of numerical optimization on a minimum of a root mean square error of the forecast for previously received information. This process of setup, so-called self-training or adaptation, precedes to the forecast itself. In the course of self-training the algorithm automatically reveals the hidden trends, frequencies and regularities of the process and uses them for the forecast.

Keywords: *numerical sequence, prediction, digital filter, linear, stationary, adaptive*

Постановка проблемы

Конечной целью прогнозирования – является повышение эффективности управления. В качестве примера можно привести прогнозирование выбега стрелки дозатора при дозировании песка, щебня, цемента для повышения точности дозирования; прогнозирующий (дифференцирующий) канал в регуляторах для повышения быстродействия систем автоматического регулирования температуры; прогнозирование курса акций для игры на бирже и максимизации прибыли и т.п.

Идея алгоритма адаптивного линейного стационарного прогнозирования числовых последовательностей приведена в [1; 2]. Числовая последовательность, подлежащая прогнозу, (например, суточное потребление энергии и т.п.) получается в результате периодической выборки и пропускается через линейный стационарный цифровой фильтр в реальном времени (по мере поступления). Полученное значение на выходе фильтра является текущим прогнозом этой же последовательности на определенное количество тактов вперед. Весовые коэффициенты фильтра

автоматически настраиваются блоком численной оптимизации по минимуму среднеквадратичной ошибки прогноза для уже полученной ранее информации. Этот процесс настройки, называемый самообучением или адаптацией, предшествует собственно прогнозу. В процессе самообучения алгоритм автоматически выявляет скрытые тренды, периодичности и закономерности процесса и использует их для прогноза. Как показало исследование на тестовых прогнозируемых числовых последовательностях, несмотря на простоту алгоритма, внешне его поведение представляется интеллектуальным. Ниже излагаются результаты исследования.

Анализ последних исследований и публикаций

Линейный дискретный стационарный прогнозирующий цифровой фильтр реального времени работает следующим образом.

Прогноз $P(N)$ на текущем такте с номером N вычисляется как сумма попарных произведений предыдущих значений прогнозируемой числовой последовательности $X(N)$, $X(N-1)$, $X(N-2)$, ... на весовые коэффициенты прогнозирующего фильтра $G(0)$, $G(1)$, $G(2)$, ... $G(m)$, образующие его весовую функцию $G(i)$:

$$P(N) = X(N) \cdot G(0) + X(N-1) \cdot G(1) + \dots = \sum_i^m X(N-i) \cdot G(i),$$

где N , i , m имеют целые значения, X , P , G имеют действительные значения.

Весовые коэффициенты $G(i)$ хранятся в памяти компьютера, прогнозируемая последовательность $X(N)$ загружается извне в реальном времени. Количество весовых коэффициентов m , т.е. порядок фильтра, ограничено, в отличие от неограниченной прогнозируемой последовательности. По мере поступления новых данных в реальном времени (N увеличивается), весовые коэффициенты всегда умножаются на самые последние m значений входной последовательности. Эта операция называется «свертка на скользящем интервале».

Весовым коэффициентам фильтра $G(0)$, $G(1)$, $G(2)$, ... $G(m)$, нужно предварительно присвоить определенные числовые значения, специально подобранные для оптимального прогноза конкретной числовой последовательности. Этот процесс называется настройкой фильтра и является далеко не тривиальной задачей. Прогноз должен минимально отличаться от будущего значения прогнозируемой числовой последовательности, которое в момент прогноза еще не доступно. Подобрать для этого вручную значения десятков весовых коэффициентов практически невозможно.

Но можно автоматизировать процесс настройки, применив процедуру адаптации, или самообучения, или автонастройки фильтра.

Самообучение производится в застывшем времени с использованием заранее записанного массива данных. Основная идея заключается в том, что в застывшем времени для любого такта доступен абсолютно точный идеальный прогноз (ведь прогнозируемое значение последовательности уже имеется в этом же массиве данных). Реальный прогноз $P(N)$, опирающийся только на предыдущие значения прогнозируемой последовательности $X(N)$, $X(N-1)$, $X(N-2)$, ..., можно сравнить с идеальным прогнозом и определить погрешность реального прогноза. Теперь нужно подобрать такие коэффициенты прогнозирующего фильтра, чтобы среднеквадратичная погрешность реальных прогнозов для всего массива данных была минимально возможной. Процесс поиска минимума автоматизируется с помощью универсального алгоритма оптимизации.

Если полученные значения весовых коэффициентов не меняются затем в ходе реального времени (являются константами), то алгоритм называется стационарным. Линейным он называется потому, что для него выполняется принцип суперпозиции (прогноз суммы двух последовательностей равен сумме прогнозов этих последовательностей по отдельности). Из принципа суперпозиции следует, что любые масштабные преобразования прогнозируемой числовой последовательности (например, увеличение всех чисел в два раза) не требуют изменения алгоритма прогнозирования. Именно поэтому во всех приведенных ниже графиках не указаны размерности на осях.

В последних публикациях предлагаются различные обобщения вышеописанного базового алгоритма, например:

1. Использование нелинейных прогнозирующих фильтров [2]. Такое обобщение оправдано лишь в случае, если изменение масштаба прогнозируемой последовательности требует изменения алгоритма прогнозирования. Нечасто встречаются случаи, когда подобное требование можно убедительно обосновать.

2. Использование рекурсии (авторегрессии) при реализации прогнозирующего фильтра. Это значит, что предыдущие прогнозы используются на следующих тактах в качестве входной информации [2]. Это позволяет упростить внутреннюю структуру и программную реализацию алгоритма в отдельных случаях, но не меняет работу алгоритма с позиций концепции «черного ящика», т.е. с точки зрения пользователя.

3. Использование взаимокорреляции нескольких входных последовательностей для повышения точности прогноза одной из них [1]. Этот случай выходит за рамки данного исследования.

Цель исследования

Благодаря относительно высокому порядку прогнозирующего фильтра (несколько десятков) и большому объему данных, глубина и сложность автоматически выявляемых (в процессе самообучения) закономерностей часто недоступна человеку. Поэтому внешне поведение алгоритма представляется интеллектуальным. Целью является исследование возможностей этого кажущегося интеллекта адаптивного линейного стационарного прогнозирующего фильтра на специально созданных тестовых прогнозируемых числовых последовательностях. Расчеты выполнены с помощью электронных таблиц EXCEL. Для определенности рассматривается прогнозирование на один такт вперед.

Изложение основного материала

Вначале рассмотрим прогнозирование детерминированных (неслучайных) последовательностей, для которых возможен абсолютно точный прогноз.

Рассмотрим для начала тривиальный пример прогнозирования последовательности, возрастающей с постоянной скоростью (арифметическая прогрессия). Это один из немногих случаев, когда оптимальный прогнозирующий фильтр можно синтезировать без помощи компьютера. Точный прогноз следует вычислять добавлением к текущему значению прогнозируемой последовательности $X(N)$ приращения ее за последний такт $X(N) - X(N-1)$:

$$P(N) = X(N) + [X(N) - X(N-1)].$$

Раскрыв скобки, получим:

$$P(N) = 2 \cdot X(N) - X(N-1).$$

Таким образом, весовые коэффициенты должны иметь численные значения:

$$G(0) = 2, G(1) = -1, G(2) = 0, G(3) = 0, \dots$$

Достаточно первого порядка прогнозирующего фильтра (весовые коэффициенты более высоких порядков равны нулю). Адаптивный прогнозатор автоматически находит эту стратегию прогноза (рис. 1).

По горизонтальной оси отложено дискретное время (номер такта). По вертикальной оси отложены уже реализованные действительные значения прогнозируемой последовательности и ее прогнозов. Значения имеют отдельные точки, соединяющие линии приведены только для наглядности. Численные значения на осях не указаны, так как они

несущественны. Из принципа суперпозиции следует инвариантность прогнозирования к любым масштабным преобразованиям прогнозируемой последовательности.

Прогноз выполняется заново на каждом такте, по мере поступления новых данных, т.е. в реальном времени. Точность ранее выполненных прогнозов можно проверить, сравнив оба графика. Как видим, прогнозы, выполненные на предыдущих тактах, подтвердились абсолютно точно, а последний, текущий прогноз будет проверен на следующем такте.

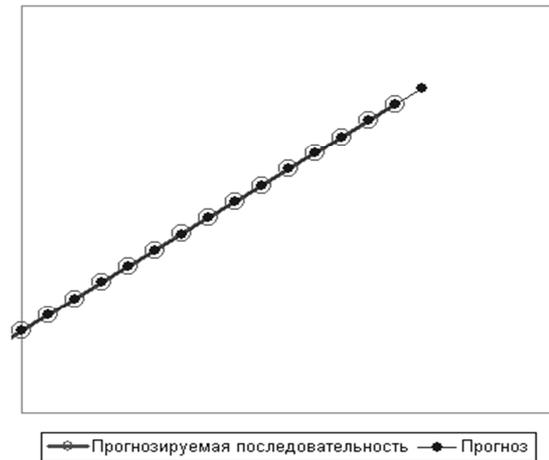


Рис. 1 Прогнозирование линейного тренда

Рассмотрим более сложный случай геометрической прогрессии (экспоненциальный тренд) как пример аperiодического (неколебательного) гладкого тренда. Адаптивный прогнозатор автоматически выявляет такой тренд и предсказывает практически точно (рис. 2), если порядок фильтра не менее четырех.

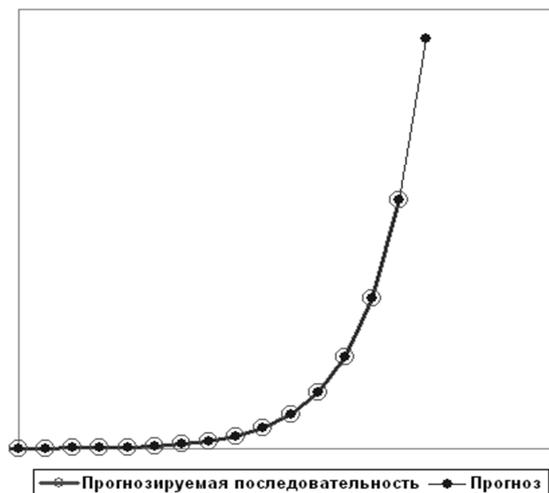


Рис. 2 Прогнозирование экспоненциального тренда

На рис. 3 представлений пример прогнозування лінійного тренда з наложеною синусоїдою. Така закономірність також автоматично виявляється і здійснюється точний прогноз, якщо порядок фільтра не менше чотирьох.

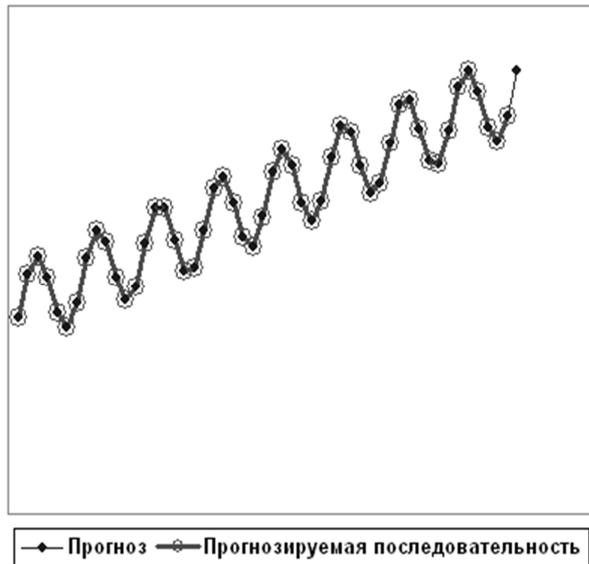


Рис. 3. Прогнозування лінійного тренда + синусоїди

Существует ошибочный стереотип, что можно прогнозировать только гладкие последовательности, без изломов и разрывов. Рис. 4 иллюстрирует абсолютно точное прогнозирование линейного тренда с наложенными периодическими импульсными отклонениями. Такая закономірність також виявляється автоматично. Порядок фільтра не менше чотирьох.

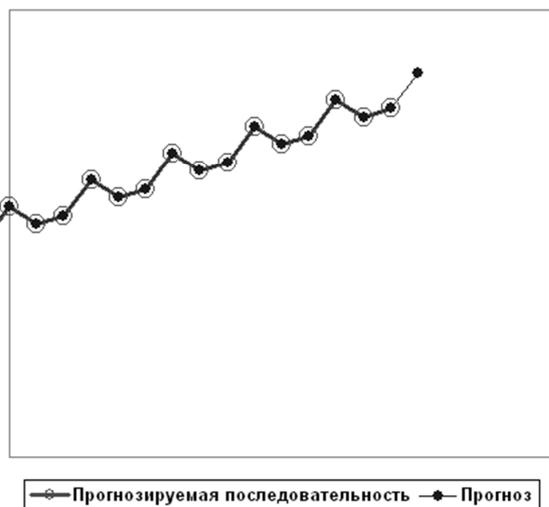


Рис. 4. Прогнозування лінійного тренда + негладкі періодичні відхилення

Рис. 5 ілюструє прогнозування лінійного тренда з наложеною близькими до періодичними коливаннями. Це детерміновані коливання, отримані як сума декількох

(в даному прикладі 4-х) синусоїд. Але так як частоти синусоїд несоизмеримы (їх відношення є ірраціональними числами), то візуально такі коливання неотличимы від випадкових. Тим не менше, адаптивний прогнозувач легко виявляє детермінованість таких коливань і здійснює абсолютно точний прогноз.

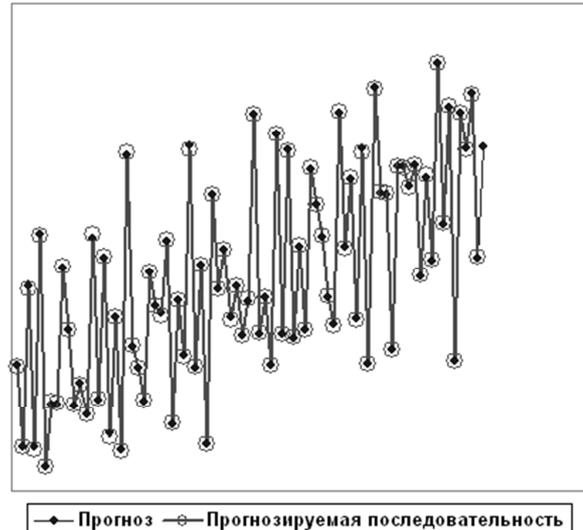


Рис. 5. Прогнозування лінійного тренда + майже-періодичні коливання

Чоловік не може віділити такі періодичні коливання від випадкових по осцилограмі в часовій області. Але частотний аналіз таких сигналів дає характерний лінійчатий амплітудо-частотний спектр (рис. 6), в відміння від випадкових коливань з «розмаганим» континуальним амплітудо-частотним спектром.

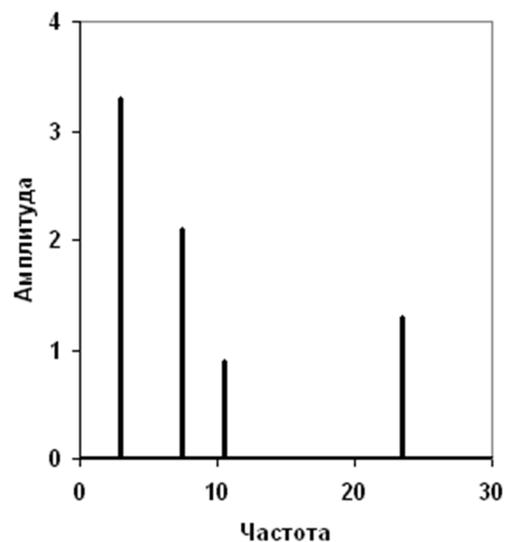


Рис. 6. Лінійчатий амплітудо-частотний спектр близьких до періодичних коливань (рис. 5)

На рис. 7 представлена залежність помилки прогнозу від порядку прогнозувального фільтра для останнього прикладу. Так як прогнозувана

числовая последовательность имеет много скрытых закономерностей, то абсолютно точное прогнозирование достигается при порядке фильтра не менее девяти. Линейный тренд требует первого порядка, а добавление каждой синусоиды (из четырех) требует увеличения порядка на два.

Теперь рассмотрим прогнозирование числовых последовательностей со случайными составляющими, для которых абсолютно точный прогноз невозможен.

Сначала рассмотрим вариант некоррелированного (т.н. «белого») шума, добавленного к прогнозируемой числовой последовательности. Некоррелированность означает, что соседние значения абсолютно независимы друг от друга. Для определенности закон распределения шума предполагаем нормальным, хотя это несущественно для прогнозирования.

Если наложенный «белый» шум незначителен (например, на уровне погрешности измерения), то ошибку прогнозирования уже нельзя уменьшать неограниченно, но можно сделать достаточно малой. Иллюстрация на рис. 7, где показан вариант «С шумом».

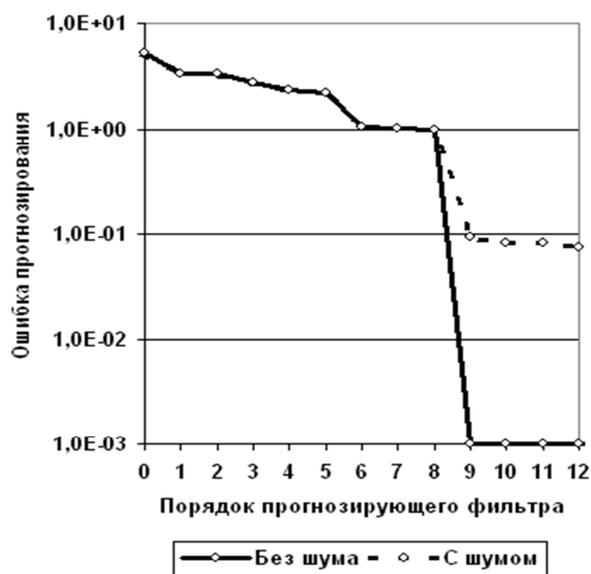


Рис. 7 Зависимость ошибки прогнозирования от порядка прогнозирующего фильтра для случая, приведенного на рис. 5

Если же наложенный «белый шум» значителен, то автоматически меняется стратегия прогнозирования. Новая стратегия заключается в том, чтобы сгладить мешающий «белый шум», оставить только закономерности (например, линейный тренд), которые затем можно использовать для прогноза (рис. 8). Такую стратегию следует признать вполне разумной. Естественно, в таких случаях ошибка прогноза оказывается значительной и принципиально неустранимой, хотя и минимально возможной.

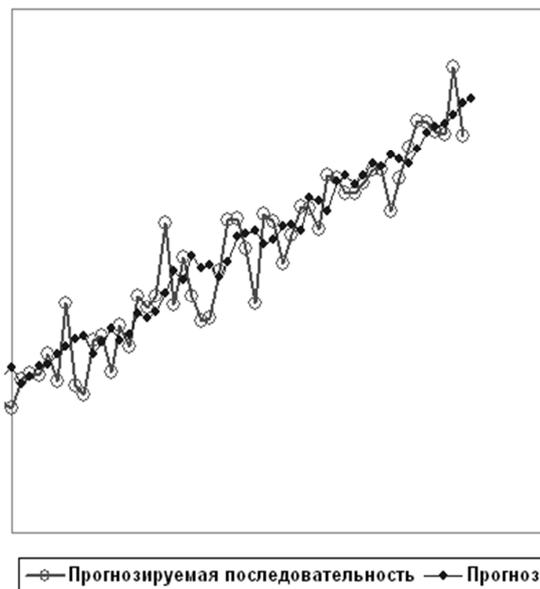


Рис. 8 Прогнозирование линейного тренда + «белый шум»

Но если случайная составляющая коррелирована (имеется зависимость между соседними значениями), то появляется возможность (которая тоже выявляется и используется автоматически) резко уменьшить ошибку прогноза. В качестве иллюстрации на рис. 9 приводится пример прогнозирования колебаний линейного осциллятора, вызванных случайным возмущением. На коротких интервалах времени (несколько тактов) эти колебания близки к синусоиде, что позволяет осуществлять почти точный прогноз.

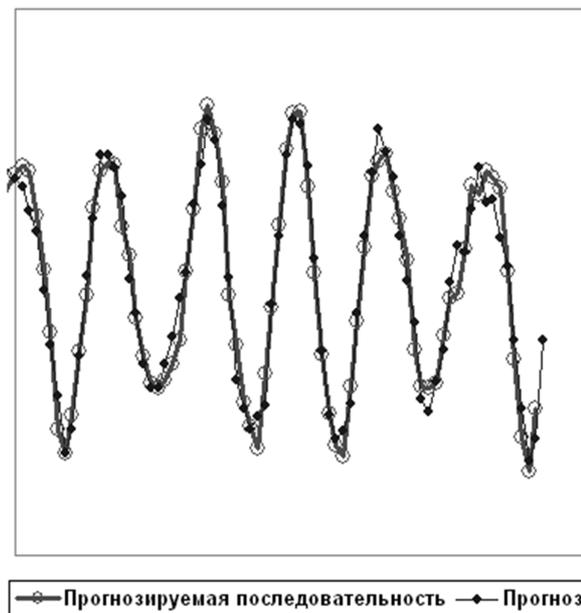


Рис. 9 Прогнозирование случайных колебаний линейного осциллятора

Между соседними значениями прогнозируемой последовательности имеется сильная зависимость, описываемая автокорреляционной функцией на рис. 10, которая и позволяет уменьшить ошибку прогноза.

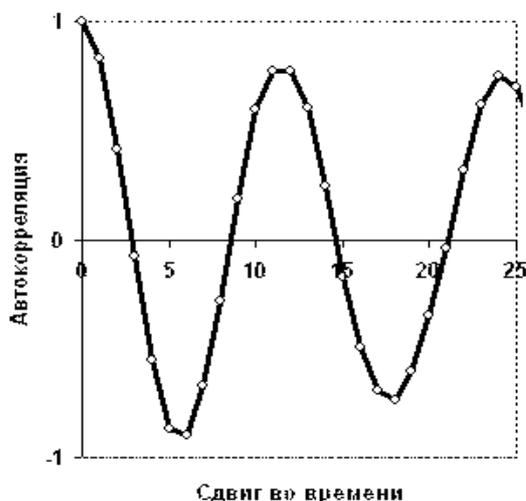


Рис. 10. Автокорреляционная функция случайных колебаний линейного осциллятора

Наконец, рассмотрим пример прогнозирования не искусственно синтезированной, а реальной числовой последовательности. На рис. 11 показан типичный график циклического изменения количества пятен на Солнце (что является мерой активности Солнца). Периодичность выборки – 1 год. Нумерация годов условна и не привязана к календарю.

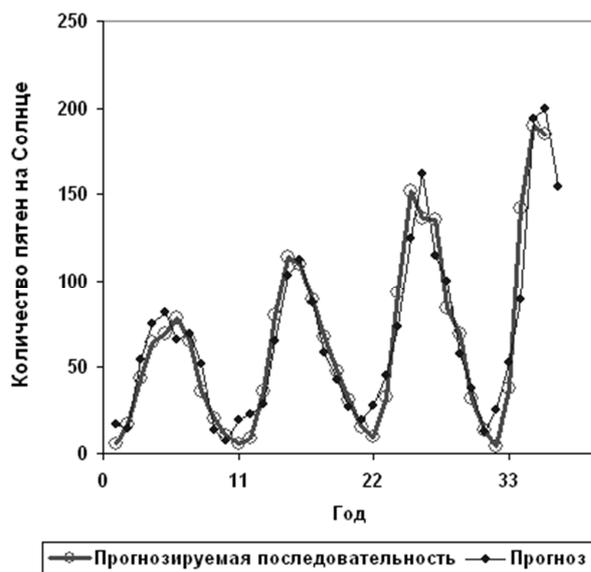


Рис. 11. Прогнозирование солнечной активности

Адаптивный прогнозатор на основе линейного стационарного фильтра седьмого порядка обеспечивает прогноз на один год вперед со среднеквадратичной ошибкой 5%. При этом прогнозатор автоматически выявил закономерности циклического изменения солнечной активности и

использовал их для прогноза. Период цикла в среднем 11 лет, но варьируется от 9 до 14 лет. Тот факт, что период и амплитуда колебаний нестабильны, не оказался помехой.

Выводы

Адаптивный прогнозатор на базе линейного стационарного цифрового фильтра автоматически выбирает оптимальную стратегию прогнозирования для конкретных входных данных. Его возможности в этом смысле превосходят возможности человека, поэтому внешне его функционирование представляется интеллектуальным.

Адаптивный прогнозатор автоматически выявляет скрытые закономерности (тренды, периодичности и т.п.) и использует их для прогноза.

Часто, даже задним числом, невозможно понять и объяснить, почему адаптивный прогнозатор принял ту или иную стратегию прогноза и какие скрытые закономерности данных он при этом использовал. Остается просто полагаться на него, как на «искусственный интеллект», превосходящий человеческий в данной узкой области.

Адаптивный прогнозатор автоматически распознает детерминированные и случайные последовательности (что не является тривиальной задачей). Первые он прогнозирует абсолютно точно, вторые – с минимально достижимой погрешностью. Так, близкие к периодическим колебания, которые являются суммой синусоид с некратными частотами и по осциллограмме неотличимы от случайного процесса, прогнозируются точно.

Адаптивный прогнозатор способен автоматически менять стратегию прогноза. Так, некоррелированную случайную составляющую («белый» шум, мешающий прогнозу), он подавляет. Коррелированные случайные составляющие использует для повышения точности прогноза.

Адаптивный прогнозатор способен автоматически изменять сложность прогнозирующего алгоритма. Чем больше имеется скрытых закономерностей, пригодных для прогнозирования, тем выше оказывается порядок прогнозирующего фильтра. Так, добавление каждой дополнительной синусоидальной составляющей увеличивает порядок прогнозирующего фильтра на два.

Усложнение закономерностей также приводит к увеличению порядка прогнозирующего фильтра. Так, например, добавление линейного тренда (арифметическая прогрессия) увеличивает порядок прогнозирующего фильтра на единицу, а добавление экспоненциального тренда (геометрическая прогрессия) увеличивает порядок на четыре.

Наличие негладкостей (разрывов и изломов) в скрытых закономерностях не мешает их выявлению и использованию для прогнозирования.

В самом общем случае линейный цифровой фильтр реализуется с помощью свертки прогнозируемой последовательности с весовой функцией фильтра. В этом случае любые масштабные преобразования прогнозируемой

числовой последовательности (например, увеличение всех чисел в два раза) не требуют изменения алгоритма прогнозирования. Не часто встречаются на практике случаи, когда можно убедительно доказать, что условие инвариантности алгоритма к масштабированию данных должно быть нарушено, и тем самым обосновать переход к нелинейным алгоритмам прогнозирования.

Список литературы

1. Иносов С.В., Шикалов В.С. *Адаптивное прогнозирование энергопотребления. // Промислова електроенергетика та електротехніка, – 2001. – Вип. 1. – С. 44-46.*
2. Берзлев О.Ю. *Сучасний стан інформаційних систем прогнозування часових рядів. // Управління розвитком складних систем, – К. – 2013. – Вип. 13. – С. 112-114.*
3. Shankar Sastry, Marc Bodson, *1994 Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness*
4. Guy A.D. Mihai H. *2002 Proceedings of the American Control Conference //Concepts, Methods and Techniques in Adaptive Control*
5. [Dumont, Huzmezan \(2002\) Concepts, methods and techniques in adaptive control](#)
6. K. J. Astrom and B. Wittenmark, *1989, 2d ed. 1994 Adaptive Control*
7. Lindorff D.C., Carrol R.L. *1974. Vol 10. Automatica. /Survey of adaptive techniques*
8. Narendra K.S., Valavani L.S *1979. Automatica. 1979. Vol. 15. №6 /Direct and indirect adaptive control*
9. [SIDNEY DUU-SHIN CHOU 1986 PASSIVELY ADAPTIVE REGULATOR DESIGN FOR SYSTEMS WITH MULTIPLE MODELS](#)

References

1. Inosov S.V., Shikalov V.S. *2001 Release 1, p.44-46 The adaptive prediction of power consuming. // Industrial power industry and electrical engineering*
2. Berzlev O.Y. *Kiev - Rel.13 2013, - Page 112-114. The current state of information systems of prediction of time series. / Control of development of difficult systems,*
3. Shankar Sastry, Marc Bodson, *1994 Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness*
4. Guy A.D. Mihai H. *2002 Proceedings of the American Control Conference //Concepts, Methods and Techniques in Adaptive Control*
5. [Dumont, Huzmezan \(2002\) Concepts, methods and techniques in adaptive control](#)
6. K. J. Astrom and B. Wittenmark, *1989, 2d ed. 1994 Adaptive Control*
7. Lindorff D.C., Carrol R.L. *1974. Vol 10. Automatica. /Survey of adaptive techniques*
8. Narendra K.S., Valavani L.S *1979. Automatica. 1979. Vol. 15. №6 /Direct and indirect adaptive control*
9. [SIDNEY DUU-SHIN CHOU 1986 PASSIVELY ADAPTIVE REGULATOR DESIGN FOR SYSTEMS WITH MULTIPLE MODELS](#)

Статья поступила в редколлегию 4.02.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.В. Мислович, Институт электродинамики НАН Украины, Киев.