

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 674.093

**АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОСАДКОВ,
ВЫПАВШИХ В ТВЕРИ В 2016–2020 ГГ.****Ф.В. Качановский***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Качановский Ф.В., 2021

Аннотация. Выполнен статистический анализ динамики удельной электропроводности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2020 гг. Подтверждена работоспособность построенной ранее (по результатам наблюдений 2016–2019 гг.) математической модели статистического ряда удельной электропроводности осадков. Установлено, что удельная электропроводность в 2020 г. продолжает расти.

Ключевые слова: удельная электропроводность, кислотность, атмосферные осадки, модель, временной ряд, тренд, циклическая компонента, сезонная компонента, случайная компонента, показатель кислотности pH .

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-47-56

Удельная электропроводность воды, мкСм/см, используется в наблюдениях за состоянием водной среды и служит суммарным индикатором антропогенного воздействия [1]. Лаборатория мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии с 2016 г. проводит наблюдения за электропроводностью атмосферных осадков, выпадающих в Твери. За пять лет (2016–2020 гг.) произведено 640 измерений (около 11 измерений в месяц). Интервалы между срочными измерениями изменяются от одних суток до двух декад.

Временная последовательность (пятилетних наблюдений) срочных значений удельной электропроводности, здесь и далее обозначаемая как c_w , представлена на рис. 1. Значения c_w группируются в основном в интервале 0–30 мкСм/см, хотя отдельные редкие «выбросы» превышают 70 мкСм/см.

Одновременно с наблюдениями за c_w наблюдаются также показатель кислотности осадков pH , количество выпадающих осадков pre и температура воздуха t . Статистический анализ электропроводности атмосферных осадков начат в 2019 г., результаты анализа четырехлетних наблюдений опубликованы в статьях [1, 2].

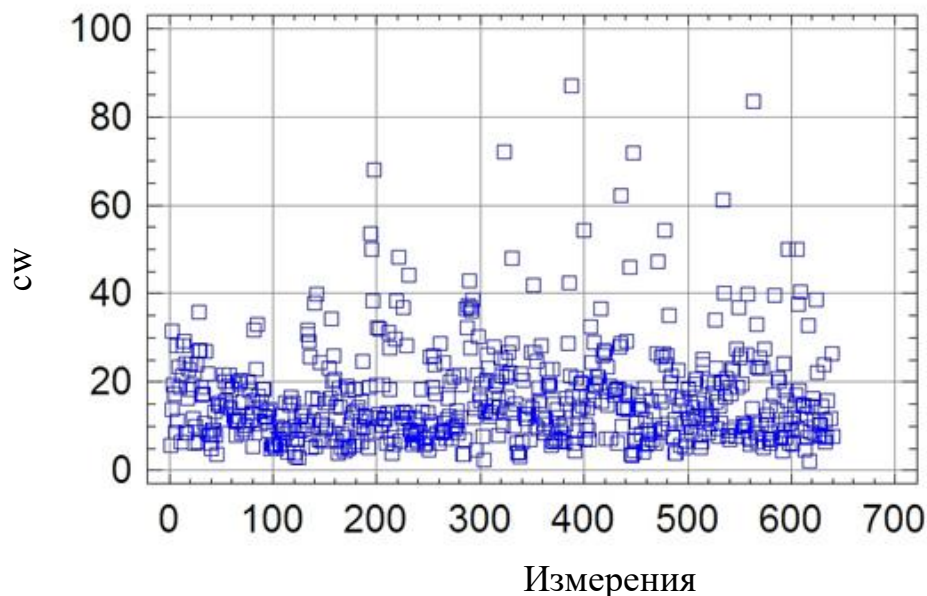


Рис. 1. Ряд срочных значений удельной электропроводности c_w (2016–2020 гг.)

В статье представлены результаты анализа удельной электропроводности атмосферных осадков c_w , выпавших в Твери за последние пять лет (в 2016–2020 гг.).

Последовательность c_w рассматривается как нестационарный временной ряд [3]. Наибольший практический интерес представляет тренд ряда. В качестве модели тренда еще в начале исследований, в 2019 г. (т. е. для четырехлетнего ряда – с 2016 по 2019 г. включительно), была принята по содержательным соображениям полиномиальная кривая регрессии. Характер значений c_w показывает (см. рис. 1), что для предварительного анализа короткого (продолжительностью четыре-пять лет) ряда приемлемы модели первого и второго порядка.

Уравнения моделей имеют вид:

$$c_w = 15,2352 + 0,00274712 \cdot n; \quad (1)$$

$$c_w = 14,486 + 0,00708704 \cdot n - 0,00000449625 \cdot n^2, \quad (2)$$

где n – порядковый номер члена ряда.

Уравнения (1) и (2) свидетельствуют о медленном росте значений c_w с течением времени, причем в квадратической модели наблюдается некоторое замедление роста, на что указывает знак «минус» в уравнении (2).

Установлена (для пятилетнего ряда) умеренно слабая положительная связь между срочными значениями удельной электропроводности c_w и показателя кислотности pH , оцениваемая коэффициентом корреляции 0,198448 (на доверительном уровне 95 %). Увеличение электропроводности c_w при росте показателя pH (рис. 2) означает, что электропроводность осадков увеличивается при снижении их кислотности. У среднемесячных значений amc_w и $ampH$ эта связь проявляется более отчетливо и характеризуется несколько большим коэффициентом корреляции (0,245955).

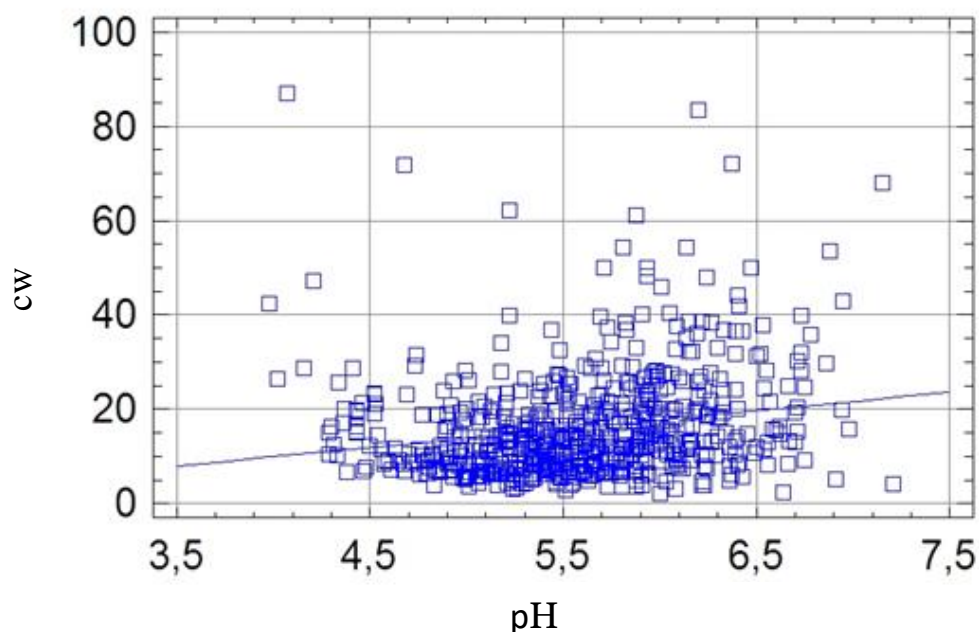


Рис. 2. Связь срочных значений $св$ и показателя кислотности осадков $рН$ (2016–2020 гг.)

Относительно слабая связь удельной электропроводности $св$ и суточного количества выпадающих осадков pre , мм, установленная в результате пятилетних наблюдений, характеризуется отрицательным коэффициентом корреляции: $-0,229997$ (на 95%-м уровне доверительной вероятности). Связь показана на рис. 3.

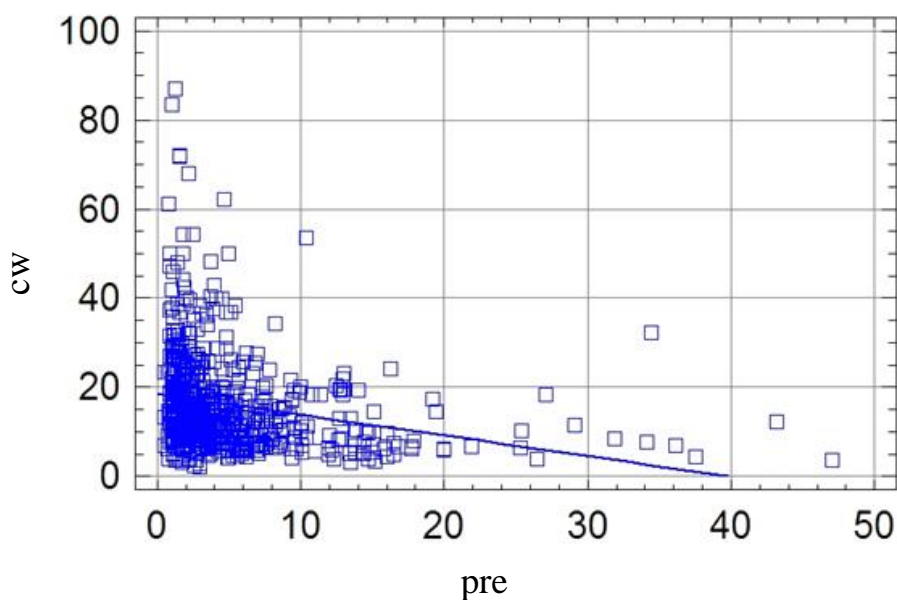


Рис. 3. Связь срочных значений электропроводности $св$ и суточного количества осадков pre (2016–2020 гг.)

Уравнение связи имеет вид

$$cw = 18,4397 - 0,463309pre. \quad (3)$$

Отметим, что связь, описываемая уравнением (3), несколько сильнее полученной для четырехлетнего ряда наблюдений [2], где коэффициент корреляции cw и pre составляет лишь $-0,210906$. В обоих случаях рост количества осадков приводит к уменьшению их электропроводности. Убывание cw при увеличении количества выпадающих осадков связано, по-видимому, с разбавлением атмосферных электролитов осадками.

Установлена относительно слабая положительная связь (рис. 4) электропроводности cw со среднесуточными температурами воздуха t , град.

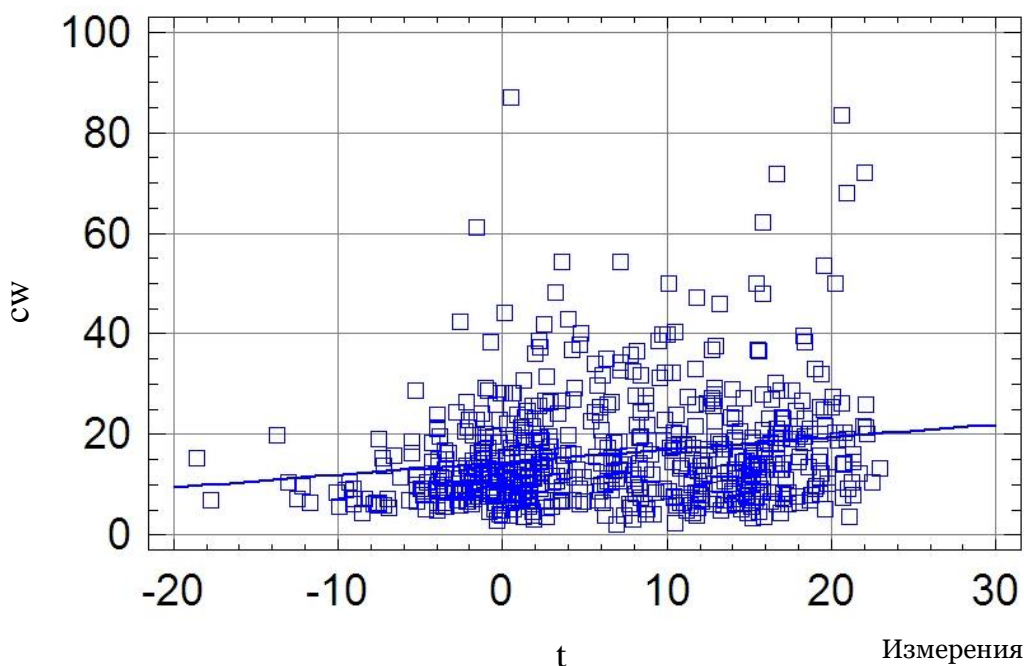


Рис. 4. Связь срочных значений электропроводности cw и среднесуточных температур воздуха t (2016–2020 гг.)

Коэффициент корреляции (для пятилетнего ряда) равен $0,186059$, уравнение связи имеет вид

$$cw = 14,4499 + 0,249723t.$$

Связь среднемесячных величин электропроводности $amcw$ и температур amt выражена сильнее: ей соответствует коэффициент корреляции $0,265817$.

Переход от наблюдавшихся в течение четырех лет [2] (срочных) значений cw к среднемесячным $amcw$ позволил рассматривать совокупность среднемесячных значений удельной электропроводности как нестационарный временной ряд [3] из 48 членов (месяцев) с постоянным шагом. Для пятилетних наблюдений ряд состоит из 60 членов. Пятилетний ряд $amcw$ показан на рис. 5.

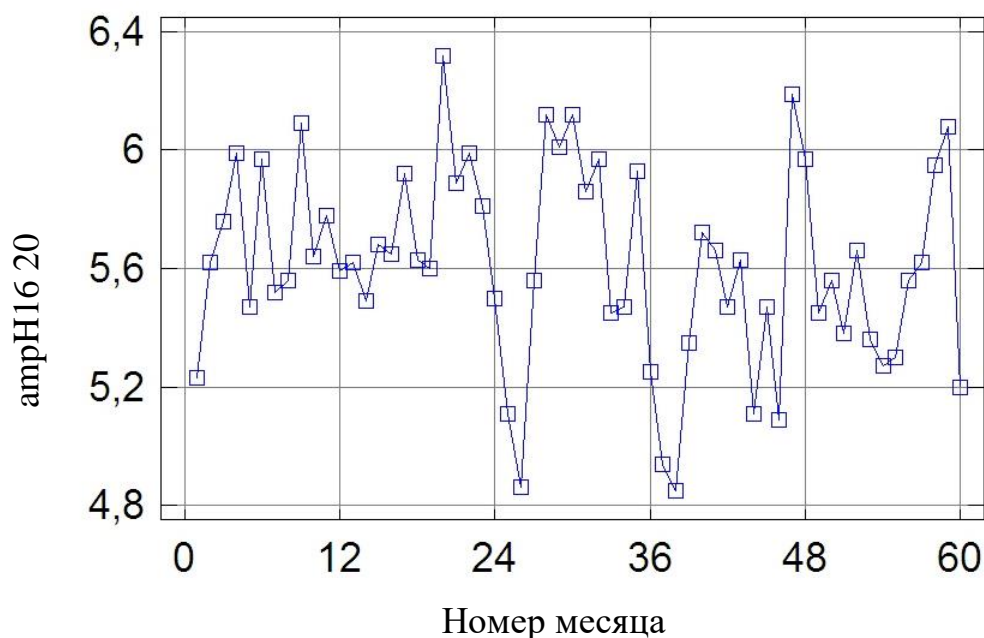


Рис. 5. Ряд среднемесячных значений удельной электропроводности $amsw$ (2016–2020 гг.)

Такой переход дал возможность применить к ряду $amsw$ существующие методы статистического анализа [3] и обнаружить некоторые важные свойства исследуемой величины. Аддитивная модель ряда $amsw$ состоит из четырех компонент: тренда, циклической, сезонной и случайной. При построении модели ряда $amsw$ видимая (наблюдаемая) изменчивость ряда разделена на закономерную (детерминированную) d_t и случайную ε_t составляющие:

$$amsw_t = d_t + \varepsilon_t.$$

Закономерная составляющая d_t представлена как функция времени. Для описания случайной составляющей ε_t необходим статистический подход.

Закономерная составляющая d_t , в свою очередь, представлена трехчленной аддитивной моделью [3]:

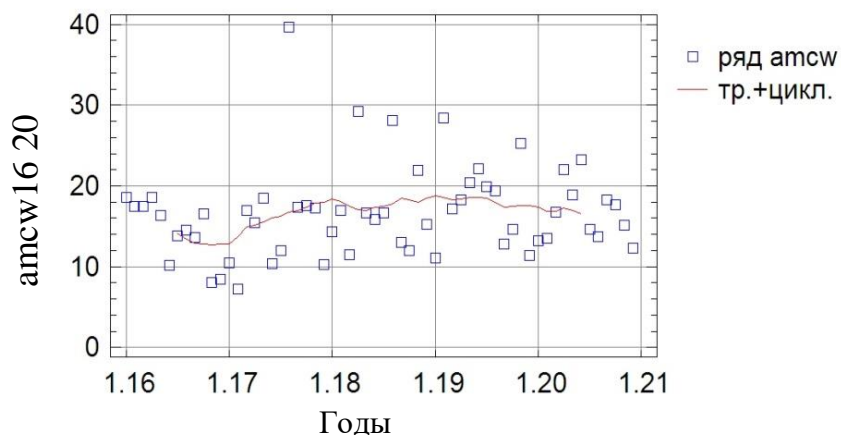
$$d_t = tr_t + c_t + s_t, \quad (4)$$

где tr_t , c_t , s_t – тренд, циклическая и сезонная компоненты соответственно.

Выполнена декомпозиция [3] ряда $amsw$. На ее первом этапе определена сумма trc_t – двух первых членов уравнения (4):

$$trc_t = tr_t + c_t.$$

Суммарная компонента trc_t (показана на рис. 6) получена сглаживанием исходного ряда $amsw$ с помощью простого арифметического скользящего среднего с интервалом сглаживания 12 значений. При этом сглаженный ряд стал короче исходного на 12 членов (оказался «обрезанным» на 6 членов в начале ряда и на 6 в конце). Отклонения членов ряда $amsw$ от линии суммарной компоненты trc_t соответствуют значениям случайной компоненты s_t .

Рис. 6. Ряд $амсв$ и суммарная компонента trc_t (2016–2020 гг.)

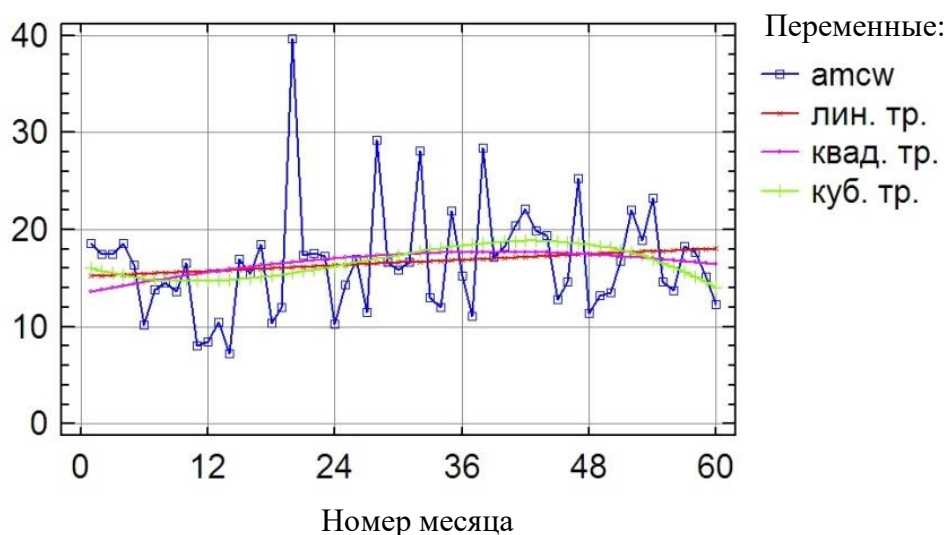
На втором этапе декомпозиции из суммарной компоненты trc_t вычтен тренд tr_t и выделена циклическая составляющая c_t ряда $амсв$:

$$c_t = trc_t - tr_t.$$

В качестве общей модели тренда, как и для ряда срочных значений $св$, принята полиномиальная кривая регрессии. Характер значений $амсв$ в ряду показывает (см. рис. 5), что для предварительного анализа этого сравнительно короткого ряда подходят модели трех первых порядков, т. е. линейная, квадратическая и кубическая (показаны на рис. 7 «на фоне» ряда $амсв$). Уравнения моделей:

$$\begin{aligned} tr_{\text{лин}} &= 15,1585 + 0,0483038n; \\ tr_{\text{ква}} &= 13,469 + 0,207113n - 0,0025658n^2; \\ tr_{\text{куб}} &= 16,4533 - 0,355744n + 0,0202418n^2 - 0,000248861n^3, \end{aligned}$$

где n – порядковый номер члена ряда (месяца).

Рис. 7. Ряд $амсв$ и три тренда: линейный, квадратический и кубический (2016–2020 гг.)

Все три линии трендов близки друг к другу. Линейный тренд характеризует поведение величины $amsw$ как медленный рост. Квадратический тренд предполагает, что в конце третьего года наблюдений медленный рост сменяется медленным убыванием. Наконец, кубический тренд отличается существованием минимума (в конце первого года), точки перегиба (в конце второго года) и точки максимума (в середине третьего года). Абсолютные значения отклонений трендов второго и третьего порядка от линейного тренда невелики и, таким образом, следует полагать, что именно линейный тренд отражает основную (и важную!) черту поведения ряда $amsw$ – медленный рост его значений в течение пяти лет наблюдений.

Сезонная компонента s_t , как и при анализе четырехлетнего ряда, моделировалась в предположении, что ее поведение связано с годовым ходом метеофакторов (прежде всего температур воздуха). Поэтому период p сезонных колебаний s_t принят равным 12 месяцам. Сезонная компонента моделировалась средними \hat{s}_i отклонениями значений sw от тренда (месячными индексами), т. е. положено [3], что

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^m (cw_{i+lp} - \hat{tr}_{i+lp}) \text{ для } i = 1, \dots, p,$$

где $m + 1 = 5$ – число (годовых) периодов в ряду наблюдений.

По этой же методике были рассчитаны сезонные (месячные) индексы среднесуточных температур воздуха t .

Годовой ход сезонных компонент $amsw$ и t (месячные индексы) показаны на рис. 8. В течение года локальные минимумы $amsw$ (в третьем, седьмом и девятом месяцах) чередуются с локальными максимумами (во втором, четвертом, восьмом и одиннадцатом месяцах). Глобальный максимум соответствует восьмому месяцу года (августу), а глобальный минимум – двенадцатому (декабрю). Максимум температурных индексов соответствует седьмому месяцу (сентябрю). Можно считать, что внутригодовая динамика удельной электропроводности сходна с поведением температур воздуха. Сезонные индексы температур воздуха ожидаемым образом монотонно возрастают от января к июлю, а затем монотонно убывают к концу года (рис. 8).

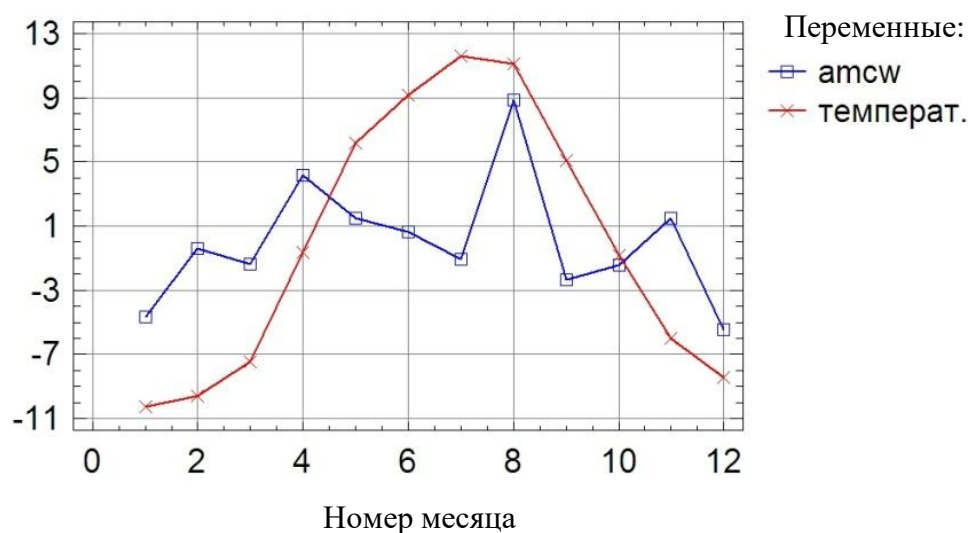


Рис. 8. Сезонные индексы ряда $amsw$ и температуры воздуха (2016–2020 гг.)

Приведенные сравнения коэффициентов корреляции срочных значений обсуждаемых величин с коэффициентами корреляции среднемесячных значений этих величин показывают, что теснота связи между среднемесячными значениями везде больше, чем между срочными значениями. Можно объяснить это снижением влияния случайных колебаний в результате осреднения срочных значений.

Случайная компонента пятилетнего ряда $amcw$ (показана на рис. 9) моделировалась так же, как и для четырехлетнего ряда [2], т. е. комбинированным случайным процессом авторегрессии-скользящего среднего $ARMA(p, q)$ [3]:

$$X(t) = \sum_{i=1}^p \varphi_i \cdot X(t-i) + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^q \theta_j \cdot \varepsilon_{t-j},$$

где параметры p и q задают порядок процесса; ε_t – процесс белого шума (среднее $M\varepsilon_t = 0$, дисперсия $D\varepsilon_t = 0$); φ , θ – параметры (коэффициенты) процессов авторегрессии и скользящего среднего соответственно.

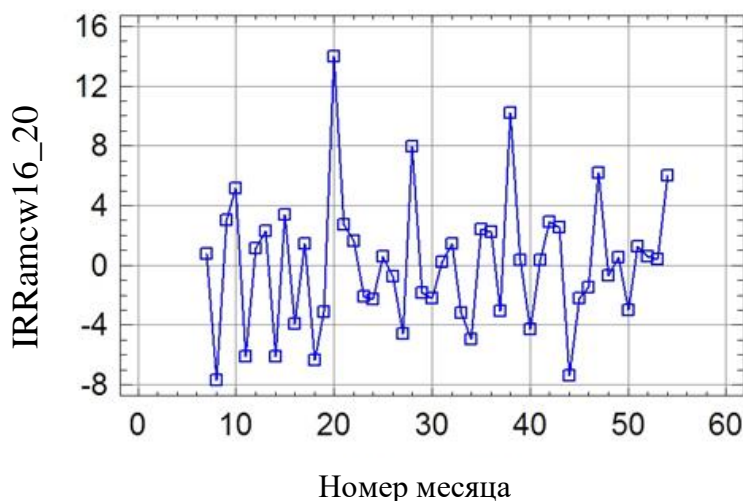


Рис. 9. Случайная компонента ряда $amcw$ (2016–2020 гг.)

Значения параметров порядка случайного процесса в результате удлинения ряда наблюдений на год не изменились, т. е. $p = 4$ и $q = 3$.

Примененная статистическая модель удельной электропроводности $amcw$ по мере накопления данных и удлинения ряда может изменять значения своих параметров, однако она представляется устойчивой и пригодной для прогнозирования динамики sw , а также для изучения связей электропроводности с метеофакторами.

ВЫВОДЫ

Построенная в 2019 г. аддитивная статистическая модель (четырёхлетнего) ряда удельной электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2019 гг., подтвердила свою пригодность для анализа данных, полученных в течение пятилетних наблюдений (2016–2020 гг.), и будет полезной для более длинных рядов наблюдений.

Установлены корреляционные связи срочных и среднемесячных значений удельной электропроводности осадков, выпадавших в Твери в 2016–2020 гг., с соответствующими значениями показателя кислотности pH , суточного количества осадков, температуры воздуха.

Наиболее тесная положительная связь существует между среднемесячными значениями удельной электропроводности и среднемесячными значениями показателя кислотности pH . Коэффициент корреляции связи составляет 0,272486 (на доверительном уровне 95 %). Это означает, что чем меньше кислотность атмосферных осадков, тем больше их электропроводность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качановский Ф.В. Электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2019. № 3 (3). С. 65–71.
2. Качановский Ф.В. Удельная электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 4 (8). С. 89–97.
3. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, 1998. 528 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КАЧАНОВСКИЙ Феликс Вячеславович – доцент кафедры гидравлики, теплотехники и гидропривода, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Качановский Ф.В. Анализ особенностей электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2020 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 47–56.

ANALYSIS OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE PRECIPITATION IN TVER DURING 2016–2020 YEARS

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Analysis had made of the precipitation's electrical conductivity (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 2016–2020 years). Time series models of the electrical conductivity were examined. Linear model has considered as adequate.

Keywords: conductivity, acidity, acid rain, precipitation, model, time series, trend, cycle component, seasonal component, residuals.

REFERENCES

1. Kachanovsky F.V. Electrical conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya «Stroitelstvo. Elektrotekhnika I Himicheskie Tekhnologii»*. 2019. No. 3 (3), pp. 65–71. (In Russian).
2. Kachanovsky F.V. Electrical specific conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya «Stroitelstvo. Elektrotekhnika I Himicheskie Tekhnologii»*. 2020. No. 4 (8), pp. 89–97. (In Russian).

3. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. Statisticheskij analiz dannyh na komp'yutere [Statistical analysis of data on a computer]. Moscow: INFRA-M, 1998. 528 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KACHANOVSKY Felix Vjacheslavovich – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Heat Engineering and Hydraulic Drive, Tver State Technical University, 22, embankment Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Analysis of the electrical conductivity of the precipitation in Tver during 2016–2020 years // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 2 (10), pp. 47–56.

УДК 621.316:005.334

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ И НАДЕЖНОСТЬЮ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

К.Б. Корнеев, Ю.М. Павлова, Р. Осей-Овусу

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Корнеев К.Б., Павлова Ю.М.,
Осей-Овусу Р., 2021

Аннотация. Отмечено, что функционирование развивающихся электрических сетей с распределенной генерацией и управлением спросом требует совершенствования подходов к управлению надежностью системы. Сделан вывод, что оценка рисков и эффективное планирование могут осуществляться только на основе высококачественного системного анализа существующей инфраструктуры, учета всех факторов. Рассмотрены некоторые риски (в первую очередь связанные с информационной безопасностью), которые требуют всестороннего исследования в целях недопущения возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: энергосистема, риски, надежность, «Интернет вещей», безопасность, управление, распределенная генерация, управление спросом, альтернативная энергетика.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-56-67

В настоящее время развитая электроэнергетическая система вынуждена обрабатывать растущее количество «субсекундных» событий, которые требуют времени отклика, слишком короткого для того, чтобы операторы системы (диспетчеры) могли отреагировать на них. Одной из современных тенденций, делающих «умные» сети необходимыми, является распространение «умных» устройств. При этом каждый элемент «умной» сети может быть подвержен микроскопическим сбоям частоты, что создает