

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНУТРЕННЕЙ СТОРОНЫ ЖЕСТИ ПОСЛЕ УДАРА МОЛНИИ

© Стружевски П., 2010

Автор статьи впервые получил оценки динамики изменения локальной температуры под воздействием удара молнии. Обозначенный результат получен на основании модели теплонасыщения бесконечного металлического тела. Также автор описывает процесс выравнивания температуры на ограниченном промежутке времени, пользуясь моделью ограничений пары параллельных плоскостей. В заключительной части статьи представлены примеры расчетов, являющиеся иллюстрацией предложенных численных моделей. Полученные результаты могут быть полезны в проектных работах, а также при анализе грозозащиты конкретных сооружений, находящихся под угрозой взрывов.

The evaluation results concerning the local temperature under the lightning stroke influence are presented. Mentioned results were obtained using the model of the thermal saturation of infinite body. Besides it, in the paper the process of the temperature equalization on limited time interval using the model of parallel planes limitations is described. The examples of calculations obtained using derived numerical models are shown. Obtained results can be used on the stage of design and analysis of the lightning protection of concrete buildings under the threat of explosion.

Постановка проблемы. Анализ последних достижений и публикаций

В проблематике грозозащиты сооружений от взрывов, реализованной с помощью жестей, являющихся естественными молниеотводами (элементами строительных конструкций), основной вопрос заключается в оценке динамики повышения температуры внутренних сторон этих молниеотводов после ударов в них атмосферных разрядов. Учитывая важность этого вопроса, некоторые теоретики молниевых явлений (например, Т. Хорват [1], Н.Р. Абрамов [2], А. В. Керн [3], Ф.Ухлиг и сотрудники [4], Р. Брокэ и сотрудники [5], а также автор этой статьи [6]) занялись анализом численных моделей для упомянутой оценки, описываемых в литературе, как правило, очень лаконично, что не позволяет заинтересованным лицам – специалистам по грозозащите выбирать оптимальную из этих моделей, а также одновременно делает невозможным их тестирование для конкретного случая.

Основная задача исследований

Учитывая вышесказанное, а также факт, что авторы европейского нормативного документа [7] (имеющего много национальных эквивалентов, в том числе польский [8]), не уточнили в нем, даже в общих чертах, рекомендуемой методики оценки повышений температур жести после ударов молний, в настоящей статье приведено полное математическое описание цифровой модели, а также конкретные результаты использования этой модели.

Для вывода указанного математического описания термических состояний жести после ударов молний, автор принял за основу принцип пунктирного проникновения в них тепла. Надо заметить, что этот принцип обычно выступает в области анализа тепловых процессов связанных с электрической сваркой [9–11].

Адаптацию пунктирного выделения тепла в жести после удара молнии можно обосновать следующими причинами:

- сложностью достоверного установления представительного радиуса круговой поверхности стыка канала молнии с внешней граничной плоскостью жести;
- созданием теоретических предпосылок для рекомендации более жестких условий грозозащиты, чем те, которые вытекают бы в случае размещения источника упомянутого тепла на круговой поверхности даже относительно небольшого радиуса;
- существенным упрощением вида зависимостей выступающих в приведенных выводах упомянутого математического описания, а также ряде формул его составляющих.

Изложение основного материала

Для описанного ниже вывода важным было определение вида решения уравнения теплопроводности, которое бы дало возможность оценить изменения – в текущем времени t – повышения температуры металлического бесконечного тела, после введения в него мгновенного, точечного источника тепла с энергией равной энергии молнии W , которую можно определить следующим образом [1, 12]:

$$W = UQ, \quad (1)$$

где U – эквивалентное приэлектродное падение напряжения в месте стыка канала молнии с жестью; Q – заряд переносимый молнией.

В то же повышение температуры, согласно [9,10] описывается выражением вида:

$$\Delta T^I = \frac{a_0 W}{\lambda_0 (4\pi a_0 t)^{1,5}} \exp\left(-\frac{R^2}{4a_0 t}\right), \quad (2)$$

Где ΔT^I – повышение температуры металлического бесконечного тела на расстоянии R от источника тепла; a_0 – коэффициент температуропроводности; λ_0 – коэффициент теплопроводности.

Использование формулы (2) позволило автору перейти к следующим этапам построения численной модели. На первом из них необходимо было определить временную зависимость повышения температуры металлического бесконечного тела с точечным непрерывным источником тепла, в текущий момент времени t' . Используя понятие дифференциала энергии молний dW и теплового потока $q(t')$, получаем:

$$dW = q(t') dt'. \quad (3)$$

Сказанное выше иллюстрирует рис. 1.

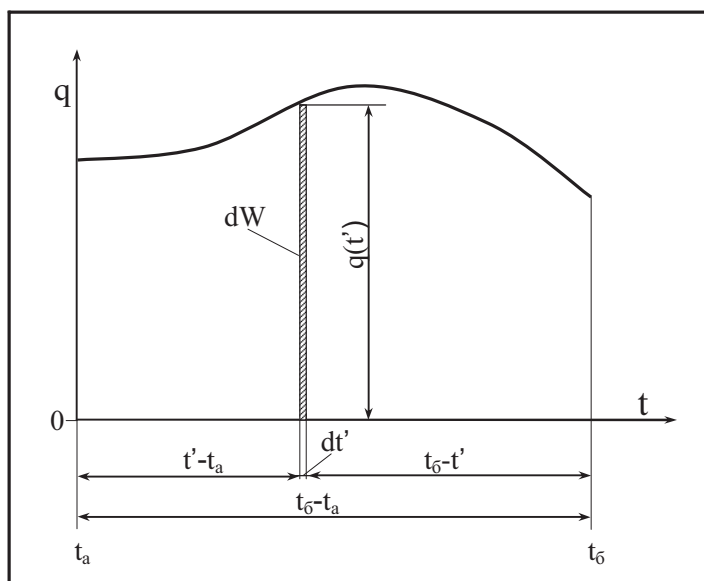


Рис. 1. Иллюстрация временных зависимостей в пределе $t_a \div t_6$ – теплового потока q

На основании формул (2) и (3) получаем следующее интегральное соотношение:

$$\Delta T^{II} = \int_0^t \frac{a_0 q(t') dt'}{\lambda_0 [4\pi a_0 (t-t')]^{1.5}} \exp\left[-\frac{R^2}{4a_0(t-t')}\right] = \frac{a_0}{\lambda_0 (4\pi a_0)^{1.5}} \int_0^t \frac{q(t') dt'}{(t-t')^{1.5}} \exp\left[-\frac{R^2}{4a_0(t-t')}\right]. \quad (4)$$

Для практических целей принимаем условие стабильности теплового потока [2, 3]. Следовательно:

$$q(t') = q_c = \frac{W}{\tau} = \frac{UQ}{\tau} = const., \quad (5)$$

где символом τ обозначено время действия молнии.

Учет условия (5) позволяет модифицировать соотношение (4) следующим образом:

$$\Delta T^{III} = \frac{a_0 q_c}{\lambda_0 \tau (4\pi a_0)^{1.5}} \int_0^t \frac{dt'}{(t-t')^{1.5}} \exp\left[-\frac{R^2}{4a_0(t-t')}\right] = \frac{a_0 UQ}{\lambda_0 \tau (4\pi a_0)^{1.5}} \int_0^t \frac{dt'}{(t-t')^{1.5}} \exp\left[-\frac{R^2}{4a_0(t-t')}\right]. \quad (6)$$

После ряда преобразований и использования функции Крампа [6], имеем:

$$\int_0^t \frac{dt'}{(t-t')^{1.5}} \exp\left[-\frac{R^2}{4a_0(t-t')}\right] = \frac{\sqrt{4\pi a_0}}{R} \left[1 - \phi\left(\frac{R}{\sqrt{4a_0 t}}\right)\right], \quad (7)$$

где символом $\phi\left(\frac{R}{\sqrt{4a_0 t}}\right)$ означена функция Крампа.

С использованием записи (7) преобразование (6) представляется следующим образом:

$$\Delta T^{III} = \frac{a_0 UQ}{\lambda_0 \tau (4\pi a_0)^{1.5}} \int_0^t \frac{dt'}{(t-t')^{1.5}} \exp\left[-\frac{R^2}{4a_0(t-t')}\right] = \frac{UQ}{4\pi \lambda_0 \tau R} \left[1 - \phi\left(\frac{R}{\sqrt{4a_0 t}}\right)\right]. \quad (8)$$

Полученную зависимость (8), можно в дальнейшем усовершенствовать используя метод отражений точечных источников тепла [6, 9]. Суть этого метода (проиллюстрированного на рис. 2), состоит в замене жести в виде бесконечного металлического тела – парой параллельных плоскостей, отдаленных друг от друга на расстоянии равном толщине жести δ , при условии, что эти плоскости не пропускают тепла.

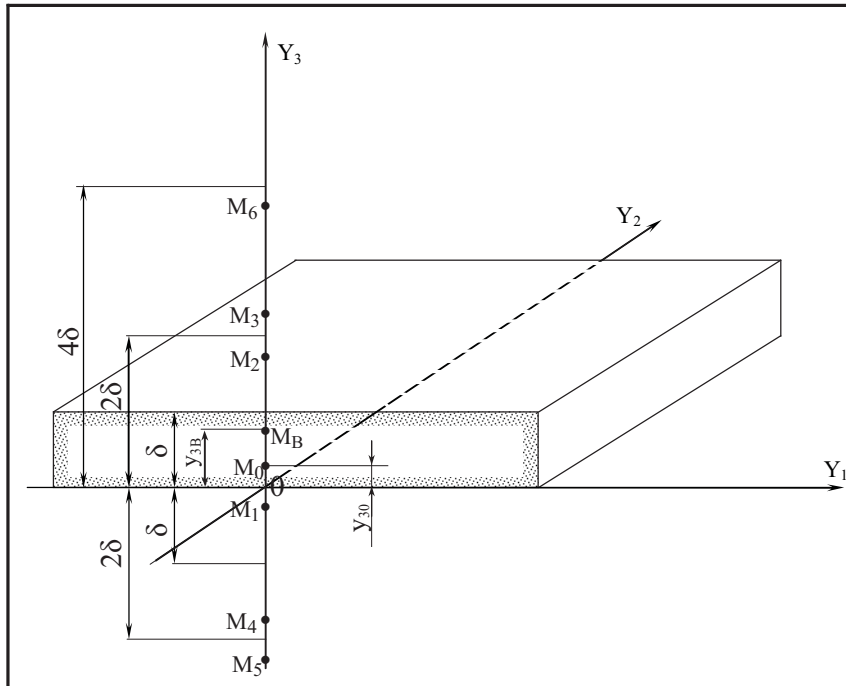


Рис. 2. Иллюстрация метода отражений точечных источников тепла

Для объяснения примененной версии метода отражений источников тепла автор установил в рассматриваемом металлическом, бесконечном теле – систему координат $OY_1Y_2Y_3$ так, чтобы выполнялись условия $y'_{3ж}=0$ и $y''_{3ж}=\delta$, а также, что на оси OY_3 , между плоскостями в пункте $M_0(y_{30})$, находится непрерывный точечный источник тепла с энергией W .

Выполняя условие, согласно которому плоскости, ограничивающие пространство, выделенное ими в бесконечном теле, не пропускают тепла, упомянутый источник следует дополнить двумя новыми источниками, находящиеся в точках $M_1(-y_{30})$ и $M_2(2\delta-y_{30})$. Эти источники как бы отражают тепло, в результате чего тепловые потоки компенсируются.

Такие отражения источников тепла, приводят к их двум бесконечным последовательностям, описываемых выражениями:

$$y'_{3n} = 2n\delta + y_{30} \quad (9)$$

и

$$y''_{3n} = 2n\delta - y_{30}, \quad (10)$$

при чем величина n принимает действительные значения.

Как показано выше, во время, непрерывного действия точечного источника тепла, процесс изменения температуры в любом пункте $M_B(y_{3B})$ жести толщины δ , описывается следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Delta T^{IV} = & \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{UQ}{4\pi\lambda_0\tau R'_n} \left[1 - \phi \left(\frac{R'_n}{\sqrt{4a_0t}} \right) \right] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{UQ}{4\pi\lambda_0\tau R''_n} \left[1 - \phi \left(\frac{R''_n}{\sqrt{4a_0t}} \right) \right] = \\ & \frac{UQ}{4\pi\lambda_0\tau} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{R'_n} \left[1 - \phi \left(\frac{R'_n}{\sqrt{4a_0t}} \right) \right] + \frac{1}{R''_n} \left[1 - \phi \left(\frac{R''_n}{\sqrt{4a_0t}} \right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

где символы R'_n и R''_n обозначают расстояния между рассматриваемыми источниками тепла и точкой $M_B(y_{3B})$. Из рис. 2, а также из уравнений (9) и (10) следует, что введенные расстояния определяются как:

$$R'_n = |y_{3B} - y'_{3n}| = |y_{3B} - 2n\delta - y_{30}|; \quad (12)$$

$$R''_n = |y_{3B} - y''_{3n}| = |y_{3B} - 2n\delta + y_{30}|. \quad (13)$$

Учитывая, что соотношение (11) справедливо для случая, когда $y_{30} = y'_{3ж} = 0$ и $y_{3B} = y''_{3ж} = \delta$, получаем:

$$R'_n = R''_n = |\delta - 2n\delta|, \quad (14)$$

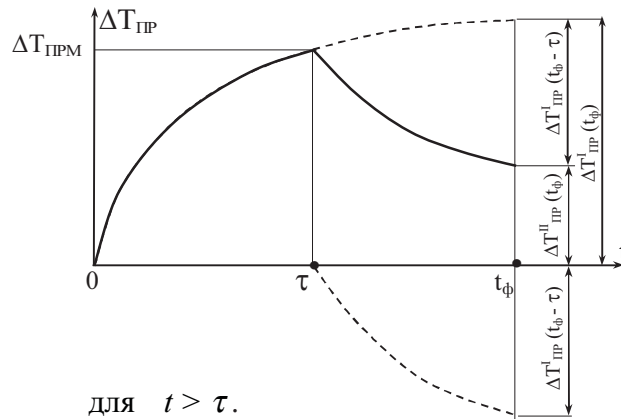
в связи с чем изменения температуры в некоторой точке жести противоположной месту удара молнии наступает во время, когда $t \leq \tau$, согласно с выражением:

$$\Delta T^V = \Delta T^I_{\text{ПР}} = \frac{UQ}{2\pi\lambda_0\tau} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|\delta - 2n\delta|} \left[1 - \phi \left(\frac{|\delta - 2n\delta|}{\sqrt{4a_0t}} \right) \right]. \quad (15)$$

Заметим, что разряд молнии и – следовательно – период теплонасыщения жести кончаются в момент $t = \tau$. Неравенство $t > \tau$ соответствует периоду выравнивания температур, в том случае когда предполагается, что первичный и вторичный источники тепловой энергии W , с тепловыми потоками q_c , продолжают свое действие при одновременном учете в вычислительной процедуре, точечных источников тепла, характеризующихся параметрами W и q_c , абсолютные значения которых равны, но противоположны по знаку, представлено графически на рис. 3. Этот рисунок показывает, что временные изменения температуры в точке противоположной месту удара молнии возможно, для $t > \tau$, оценивать на основе зависимости:

$$\Delta T^{VI} = \Delta T^{II}_{\text{ПР}} = \Delta T^I_{\text{ПР}}(t) - \Delta T^I_{\text{ПР}}(t - \tau). \quad (16)$$

для $t \leq \tau$;



для $t > \tau$.

Рис. 3. Оценка временной зависимости температуры $\Delta T_{ГРМ}$ в промежутке от $t > \tau$ до момента t_ϕ

Для рассматриваемого случая временная зависимость $\Delta T_{ГРМ}$ имеет вид:

$$\Delta T^{III} = \Delta T_{ГРМ} = \begin{cases} \Delta T_{ГРМ}^I = \frac{UQ}{2\pi\lambda_0\tau} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|\delta - 2n\delta|} \left[1 - \phi \left(\frac{|\delta - 2n\delta|}{\sqrt{4a_0t}} \right) \right] \\ \Delta T_{ГРМ}^{II} = \frac{UQ}{2\pi\lambda_0\tau} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|\delta - 2n\delta|} \left[\phi \left(\frac{|\delta - 2n\delta|}{\sqrt{4a_0(t-\tau)}} \right) - \phi \left(\frac{|\delta - 2n\delta|}{\sqrt{4a_0t}} \right) \right] \end{cases} \quad (17)$$

Следует отметить, что с точки зрения грозозащиты, практическое значение имеют, в основном, максимум $\Delta T_{ГРМ}$ повышения температуры, определенный согласно выражения (17) [1, 3, 6].

Результатом вычислений, приведенных в данной статье, являются следующие оценки значений величины $\Delta T_{ГРМ}$, полученные автором:

- для жестей толщиной δ рассматриваемых Т. Хорватом [1] (который выбирал эти толщины в пределах 3÷7мм, с шагом 1мм) из металлов используемых в работе А. Сова [13] (то есть: железа, алюминия и меди);
- для значений эквивалентного, приэлектродного падения напряжения U равного 15В; такой уровень был определен автором статей [6,14], а кроме того Х. Принцем [15] и Т. Хорватом;
- для значения заряда Q нисходящего атмосферного разряда; равного 10Ас, что вытекает из исследований приведенных С. Шпором и Я. Самулой [16], Г .Д. Мк Канном и Е.Л Хардером, а также К . Бергером;
- для двух значений времен τ – первое из которых базируется на исследовании З. Флисовского [12], а второе – рекомендованное европейской нормой [17].

Выше описанные ограничения, приведены в табл. 1, а результаты оценки величины $\Delta T_{ГРМ}$ представляет табл. 2.

Таблица 1

Исходные значения папараметров

металл	δ	U	Q	τ
Fe, Al, Cu	3–7 мм с шагом 1 мм	15 В	10 Ас	200 мс, 500 мс

**Примеры результаты вычислений параметра $\Delta T_{\text{ПРМ}}$
сделанных при использовании численной модели согласно формуле (17)**

Metal	δ , мм	τ	
		200 мс	500 мс
Fe	3	309 °C	245 °C
	4	137 °C	123 °C
	5	71 °C	68 °C
	6	42 °C	41 °C
	7	26 °C	26 °C
Al	3	204 °C	108 °C
	4	122 °C	68 °C
	5	79 °C	47 °C
	6	54 °C	34 °C
	7	38 °C	26 °C
Cu	3	147 °C	78 °C
	4	87 °C	49 °C
	5	56 °C	34 °C
	6	38 °C	24 °C
	7	27 °C	18 °C

Выводы

1. Исходные предпосылки базирующиеся на том, что в металлическом бесконечном теле действует мгновенный, точенный источник тепла, энергия которого равна энергии молнии, генерирующей температурное поле, дало возможность автору впервые получить математическое описание этого температурного поля с помощью использования метода отражений источников в двух параллельных плоскостях;

2. Полученная автором и описанная в статье численная модель оценки местных повышений температуры жестей после ударов молний может быть использована проектировщиками грозозащитных инсталляций пользующихся стандартом EN 62305-3:2006 или его национальными эквивалентами, в случаях разработок систем молниезащиты объектов, в которых жести являются натуральными молниеотводами.

1. Horváth T. *Durchwärmung des Bleches von Tankdächern beim Blitzeinschlag*; 17. *Internationale Blitzschutzkonferenz (IBK), Den Haag 1983, Referat No. 2.4.* 2. Абрамов Н.Р. *Расчет теплового воздействия канала молнии на металлические объекты*; *Известия Академии Наук СССР – Энергетика и Транспорт*, No. 1/1986, с. 118. 3. Kern A.W.: *The heating of metal sheets caused by direct lightning strikes – model and measurment*; 20. *International Conference on Lightning Protection (ICLP), Interlaken 1990, paper No 5.2.* 4. Uhlig F. and co-authors : *An inverse method approach to evaluate the energy transfer occuring at the electrode surface under the effect of an electrical arc*; 24. *International Conference on Lightning Protection (ICLP), Birmingham 1998, paper No. 9b.* 5. Brocke R. and co-authors: *The effects of long duration lightning currents and their simulation*; 25. *International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rhodes 2000, paper No. 5.7.* 6. Strużewski P.: *Analytical studies of aluminium sheets heating after direct lightning strikes*; 26. *International Conference on Lightning Protection (ICLP), Kraków 2002, paper No. 8b.5.* 7. EN 62305-3:2006: *Protection against lightning-Part 3: Physical damage to structures and life hazard.* 8. PN EN 62305-3:2009: *Ochrona odgromowa-Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów budowlanych i zagrożenie życia.* 9. Myśliwiec M.: *Ciepłno-mechaniczne podstawy spawalnictwa*; WNT, Warszawa 1972. 10. Adamiec P.: *Ciepłne procesy spawalnicze*; rozdział No. 3 w pracy zbiorowej p.t. *Poradnik inżyniera – Spawalnictwo*; tom 1, WNT, Warszawa 2000. 11. Ferenc K.: *Spawalnictwo*; WNT, Warszawa 2007. 12. Flisowski Z.: *Trendy rozwojowe ochrony odgromowej budowli, część I p.t. Wyładowania at-mosferyczne jako źródło zagrożenia*; PWN, Warszawa 1986.

13. Sowa A.: *Kompleksowa ochrona odgromowa i przepięciowa; COSIW SEP, Warszawa, 2005.* 14. Kolasa A., Strużewski P.: *Badania wpływu przerw bezprądowych w wielokrotnych wyladowaniach atmosferycznych na piorunową perforację metalowych pokryw dachów; Wiadomości Elektrotechniczne, No.7/ 1991, s.258.* 15. Prinz H.: *Gewitterelektrizität als Gefahr; Bulletin SEV, No.24/1976, S.1313.* 16. Szpor S., Samuła J.: *Ochrona odgromowa, tom I; WNT, Warszawa 1983.* 17. EN 62305-1:2006: *Protection against lightning – Part 1: General principles.* 18. PN EN 62305:2008: *Ochrona odgromowa – Część 1: Zasady ogólne.*

УДК 621.3.011.72

П.Г. Стахів, Ю.П. Франко

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ТЗЕ,
Бучацький інститут менеджменту та аудиту,
кафедра економічного і математичного моделювання

СТРУКТУРНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ІНТЕРВАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦІОНУВАННЯ МАЛОЇ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ (МГЕС)

© Стахів П.Г., Франко Ю.П., 2010

Розглянуто задачу структурної ідентифікації інтервальної моделі характеристик функціонування малої гідроелектростанції (МГЕС). З метою розв’язання цієї задачі запропоновано використовувати методи інтервального аналізу.

This paper is devoted to the solving task of the structural identification of the interval model characteristics of the small hydroelectric power station functioning (SHEPS) has been considered. For solution of this task the interval data analysis methods are applied.

Вступ

Енергетична безпека країни є одним із основних пунктів стратегічного розвитку держави, особливо з врахуванням енергетичної кризи в Європі. Тому оптимальне використання електроенергетичної системи (ЕЕС) України є важливою умовою для забезпечення її енергетичної незалежності. Математичне моделювання на основі системного підходу є ефективним інструментом для дослідження ЕЕС, зокрема процесів споживання та генерування електроенергії. Важливим є перехід до нетрадиційних джерел енергоресурсів, а також раціональне використання усіх наявних ресурсів. Одним із альтернативних видів є гідроресурси. Україна має достатньо велику кількість малих річок, енергію яких з успіхом та без шкоди довкіллю можна було б використовувати для додаткового вироблення електроенергії. Тим більше, що у післявоєнні роки нагромаджено достатній досвід використання такого виду ресурсів. Зокрема у м. Бучачі, Тернопільської області на річці Стрипа у 1952 р. була введена в експлуатацію мала гідроелектростанція (МГЕС) "Топольки", яка на той час виробляла близько 100 кВт електроенергії. Частково відновлена і введена в експлуатацію навесні 2003 р. МГЕС функціонує і сьогодні. Проте подальше збільшення потужності МГЕС вимагає дослідження її характеристик генерування електроенергії, вивчення можливостей щодо забезпечення заданого графіка генерування потужності. Для розв’язування цієї задачі необхідно побудувати математичну модель прогнозування коридору генерованої електроенергії МГЕС залежно від факторів впливу.