

Литература

1. Оксид индия-олова [Электронный ресурс] // Википедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Оксид_индия-олова (дата обращения: 25.04.2020).

2. *Вейко В.П.* Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / В.П. Вейко, В.Н. Смирнов, А.М. Чирков, Е.А. Шахио. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 103 с.

3. *Dr-Ing N.V. Mandich.* Surface preparation of metals prior to plating / Mandich Dr-Ing N.V. // AESF SUR/FIN. – 2002. – PP. 761–828.

4. *Кощев М.И.* Простые нейросетевые алгоритмы для волнового метода определения места повреждения электросети / М.И. Кощев, А.Л. Славутский, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 110–118.

5. *Славутская Е.В.* Нейросетевой системный анализ уровневых психологических характеристик / Е.В. Славутская, В.С. Аbruков, Л.А. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 1. – С. 164–173.

6. *Аbruков В.С.* Методы интеллектуального анализа данных при создании баз знаний / В.С. Аbruков, С.В. Аbruков, А.В. Смирнов, Е.В. Карлович // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 140–146.

7. *Ануфриева Д.А.* Применение методов интеллектуального анализа данных в физических исследованиях. Многофакторные модели детонации / Д.А. Ануфриева, М.И. Кощев, В.С. Аbruков // Гидродинамика больших скоростей и кораблестроение: сб. науч. тр. XII Междунар. летней научн. школы-конф., посв. 155-летию со дня рождения академика А.Н. Крылова. – 2018. – С. 221–226.

Д.А. Степанова, А.Ю. Федотов, В.А. Наумов, В.И. Антонов
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ СКОРОСТНОГО ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В ясную погоду, когда фотомодули солнечной станции равномерно освещены, энергетическая характеристика станции $P(U)$ имеет только один пик, соответствующий максимуму вырабатываемой в этом режиме мощности MPP (Maximum Power Point). Известные

алгоритмы поиска точки максимальной мощности хорошо справляются с задачей поиска и поддержания режима станции вблизи MPP в этом режиме – режиме равномерной освещенности. Одним из таких методов, стандартно применяемым в режиме равномерного освещения, является метод «возмущения и наблюдения» (P&O – Perturb and Observation) [1–3]. Метод отличает наглядность и простота. Согласно ему рабочая точка поддерживается вблизи MPP на энергетической характеристике за счёт непрерывного сканирования положения MPP путем изменения напряжения на выходе фотомодуля в окрестности точки MPP. Если при повышении напряжения наблюдается увеличение мощности, то предполагается, что MPP расположена справа, если наоборот, то – слева. В первом случае напряжение увеличивают, а во втором – уменьшают.

В условиях облачности фотомодули в разных частях обширной площади солнечной станции находятся под разным освещением. Частичная затененность фотомодулей приводит к появлению на энергетической характеристике $P(U)$ станции множества локальных пиков LMPP (Local Maximum Power Point), среди которых только одна обеспечивает максимум вырабатываемой станцией мощности (рис. 1, а). При этой конфигурации освещенности метод P&O теряет способность выявления точки максимальной мощности и приводит режим станции в точку локального пика с существенно меньшей выработкой электроэнергии. Поскольку конфигурация освещенности может меняться относительно быстро, то для управления эффективностью солнечной станции потребуются специальные алгоритмы, обеспечивающие быстрое определение и выведения режима станции в окрестность глобального максимума мощности.

В докладе рассматривается новый алгоритм, реализующий скоростной вывод режима солнечной электростанции в окрестность точки с максимальной выработкой электроэнергии с последующей передачей управления стандартным методом поддержания рабочей точки.

Универсальный алгоритм управления режимом станции. В условиях быстро меняющейся конфигурации освещенности фотомодулей станции алгоритм управления режимом солнечной станции должен обладать способностью за единицы шагов поместить рабочую точку в окрестность глобального максимума мощности на энергетической характеристике.

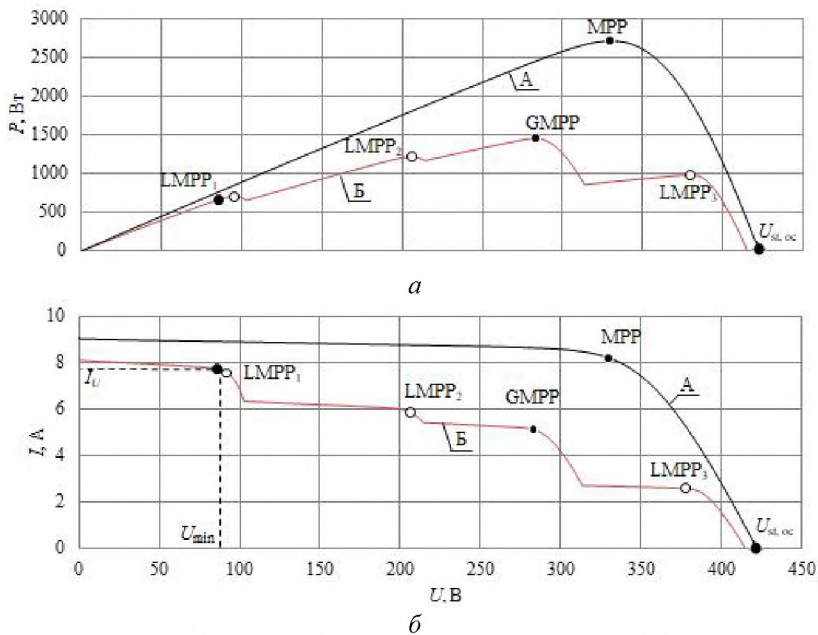


Рис. 1. Энергетическая $P(U)$ (а) и вольт-амперная $I(U)$ (б) характеристики фотомодуля при равномерной освещенности (А) и при частичном затенении (Б); темными кружочками обозначены точки GMPP (MPP), светлыми – LMPP

В то же время алгоритм должен быть универсальным и пригодным для применения в управлении солнечными станциями с различным числом и типом фотомодулей. Такого свойства алгоритма можно добиться, если энергетическую и вольтамперную характеристики солнечной электростанции представить в виде нормированных характеристик (рис. 2) [1, 4].

Приведение характеристик к унифицированному виду осуществляется, приняв в качестве базисных величин паспортное значение напряжения холостого хода $U_{st,oc}$ и значение тока I_U при минимально допустимом напряжении, гарантирующем стабильную работу инвертора, например U_{min} . Таким образом, измерения электрических величин в относительных единицах будут иметь вид:

$$U_{r.u.} = U / U_{st,oc}, \quad I_{r.u.} = I / I_U, \quad P_{r.u.} = U_{r.u.} \cdot I_{r.u.}$$

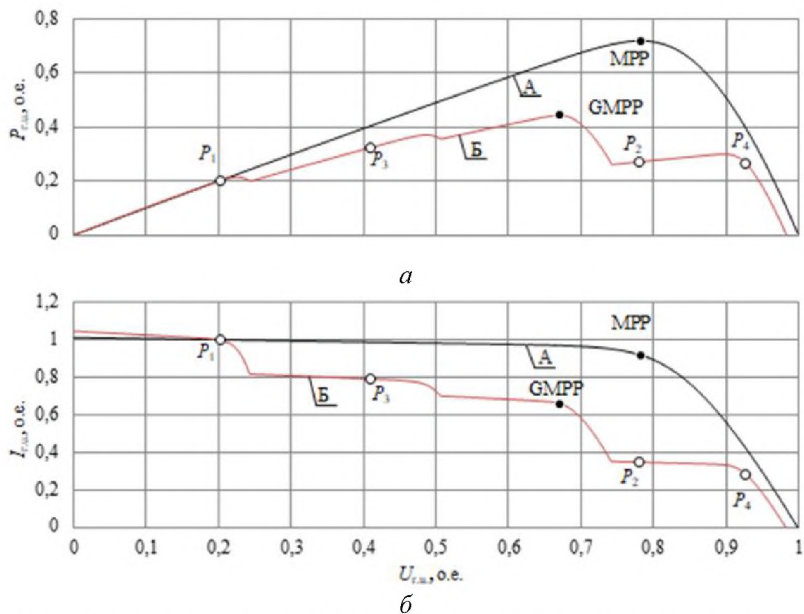


Рис. 2. Нормированные энергетическая (а) и вольт-амперная (б) характеристики солнечной электростанции при равномерном освещении (А) и в условиях частичного затенения (Б); светлыми кружочками показаны контрольные точки, используемые предлагаемым алгоритмом; остальные обозначения соответствуют обозначениям рисунка рис. 1

Для целей скоростного поиска точки глобального максимума мы используем алгоритм, основанный на измерении вырабатываемой станцией мощности в четырех контрольных точках нормированной энергетической характеристики. Значения мощностей P_1 и P_2 определяются при $U = U_{\min}$ и $U = 0,85U_{st,oc}$ соответственно, а P_3 и P_4 выбираются в зависимости от характера изменения кривой энергетической характеристики при различной конфигурации освещенности фотомодулей (рис. 2). Причем мощность $P_1 = 0,2$ во всех случаях, поскольку нормированные напряжение и ток равны $U_{1,r.n.} = 0,2$ и $I_{U,r.n.} = 1$ соответственно. Поэтому мощность P_1 непосредственно в обучении классификаторов не участвует и лишь задает положение трёхмерного пространства существенных прецедентов обучающей выборки в многомерном пространстве.

Другими словами, обучение нейронной сети проводится в трёхмерном пространстве с координатами (P_2, P_3, P_4) (рис. 3).

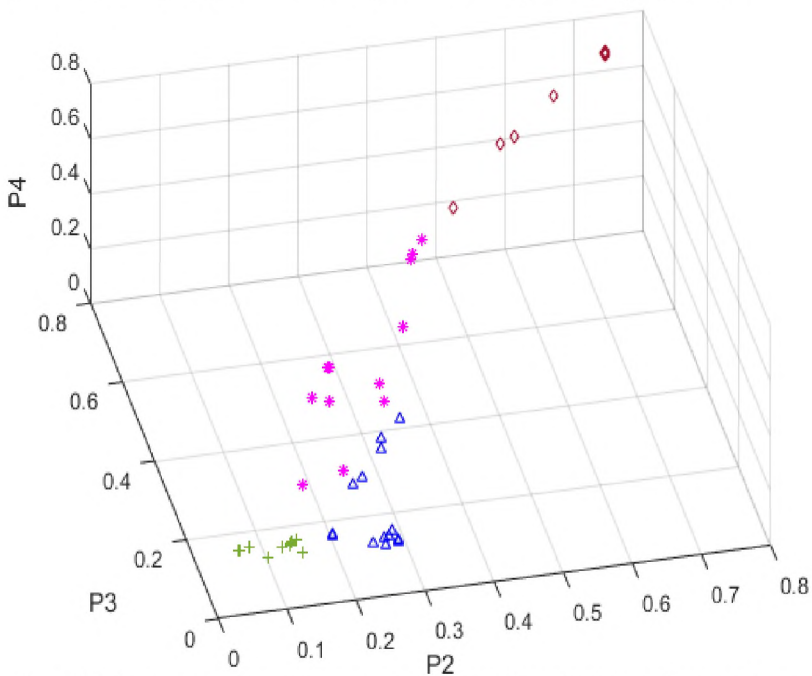


Рис. 3. Пространство прецедентов обучающей выборки; выбранный на рисунке ракурс показывает, что прецеденты различных классов могут быть строго разделены; приняты следующие обозначения прецедентов: «+» – первого, «Δ» – второго, «*» – третьего, «◊» – четвертого классов

Поиск и отслеживание точки глобального максимума мощности (Global Maximum Power Point – GMPP) происходит одновременно с изменением режима работы станции, что в условиях быстро меняющейся конфигурации освещенности потребует скоростного вывода режима солнечной электрической станции в окрестность одной из рассматриваемых контрольных точек, близкой к GMPP. Номер контрольной точки, определяющий стартовую позицию при передаче управления стандартному методу поддержания точки максимальной мощности, например, методу P&O, будет задан настроенной нейронной сетью путем отнесения текущего вектора измерений x_j к одному из классов (рис. 4).

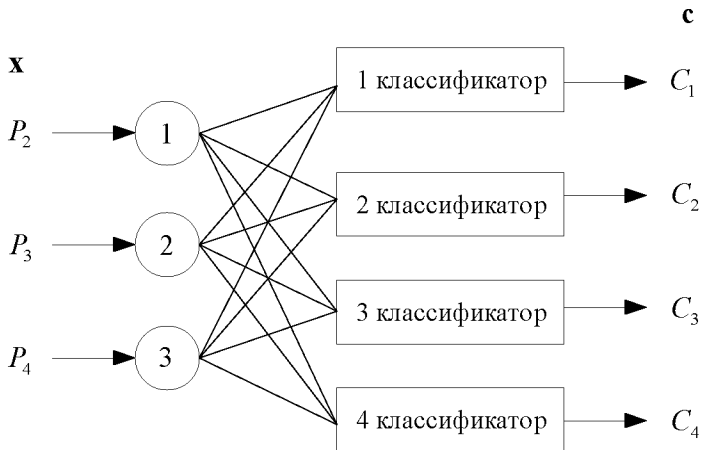


Рис. 4. Нейронная сеть для интеллектуального алгоритма быстрого поиска GMPP

Хотя в обучении участвуют только три точки, настройка нейронной сети потребует последовательного обучения четырех классификаторов, каждый из которых будет отделять один класс от всех остальных по принципу «один против всех» [5, 6]. На рис. 5 показан ход настройки нейронной сети. Взаимное расположение разделяющих поверхностей классификаторов показано на рис. 6. В работе используется один из известных методов машинного обучения, так называемый метод опорных векторов – Support Vector Machine (SVM), основы применения которого в задачах электроэнергетики исчерпывающе рассмотрены в работах [7, 8].

Выводы. Нейросетевой алгоритм поиска точки реального максимума мощности для текущей конфигурации освещенности солнечной фотоэлектрической станции за четыре шага обеспечивает скоростной вывод режима станции к окрестности глобального максимума вырабатываемой мощности в любых условиях частичного затенения с последующей передачей управления стандартным методом поддержания рабочей точки. Благодаря использованию нормированных энергетической и вольтамперной характеристик алгоритм поиска точки глобального максимума приобретает универсальность, а прецедентное пространство обучающей выборки сокращает свою размерность на единицу.

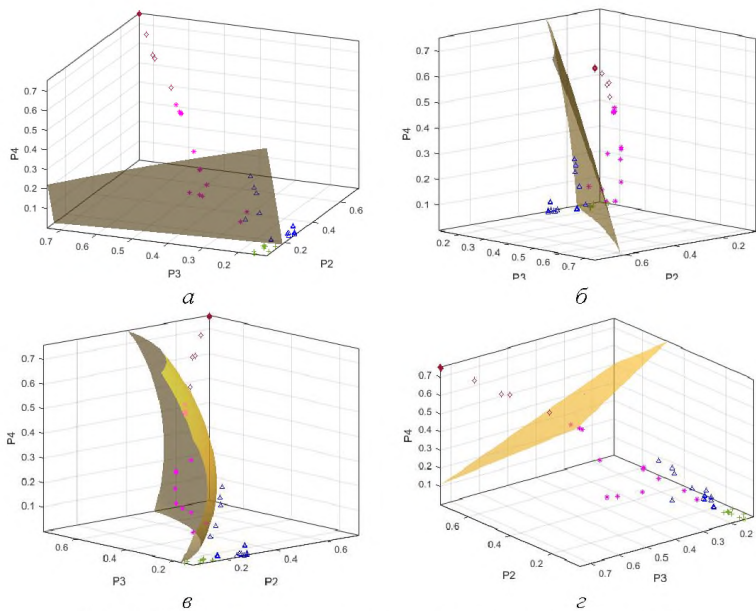


Рис. 5. Разделяющие поверхности первого (*а*), второго (*б*), третьего (*в*) и четвертого (*г*) классификаторов нейронной сети; обозначения соответствуют обозначениям рис. 3

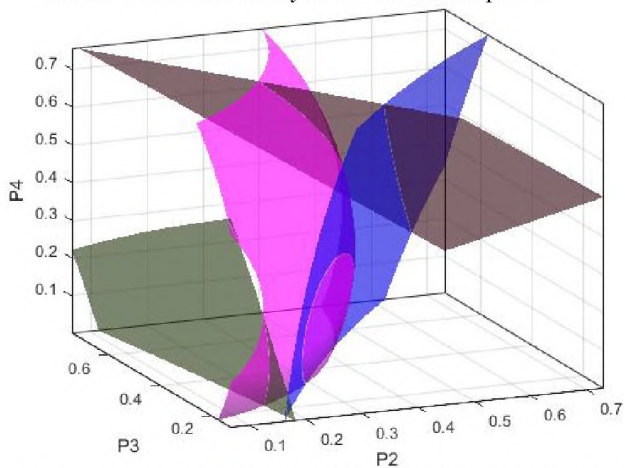


Рис. 6. Расположение разделяющих поверхностей интеллектуального алгоритма поиска точки GMPP в пространстве прецедентов

Литература

1. Федотов А.Ю. Обеспечение эффективности солнечной фотоэлектрической станции в условиях быстро меняющейся конфигурации освещенности / А.Ю. Федотов, Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов // Релейная защита и автоматизация. – 2020. – № 1. – С. 42–47.

2. Hohm D.P. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms / D.P. Hohm, M.E. Ropp // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2003. – No. 11. – PP. 47–62.

3. ESRAM T. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques / T. ESRAM, P.L. Chapman // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – Vol. 22, No. 2. – PP. 439–449.

4. Федотов А.Ю. Задачи и методы поддержания эффективности солнечных электрических станций / А.Ю. Федотов, В.А. Наумов, В.И. Антонов // РЕЛАВЭКСПО–2019: сб. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 224–231.

5. Stepanova D.A. Deep Learning in Relay Protection of Digital Power Industry / D.A. Stepanova, V.A. Naumov, V.I. Antonov // 2nd Int. Youth Scientific and Technical Conf. on Relay Protection and Automation. – 2019. – PP. 299–315. – DOI: 10.1109/RPA.47751.2019.8958378.

6. Степанова Д.А. К теории глубокого обучения релейной защиты / Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 319–327.

7. Степанова Д.А. Задачи классификации и глубокого обучения в релейной защите цифровой электроэнергетики / Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов // РЕЛАВЭКСПО–2019: Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: сб. докл. научно-техн. конф. молодых специалистов (Чебоксары, 23–26 апреля 2019 г.). – С. 116–122.

8. Степанова Д.А. Фундаментальные основы глубокого обучения релейной защиты / Д.А. Степанова, В.А. Наумов, В.И. Антонов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 319–327.