

## APPLICATION OF AN IOT-BASED POTENTIALLY INDUCED DEGRADATION (PID) COMPENSATION SYSTEM<sup>9</sup>

---

**Atanas Kabakchiev**

Department of Electronics

University of Ruse "Angel Kanchev"

Ruse, Bulgaria

E-mail: akabakchiev@uni-ruse.bg

**Prof. Boris Evstatiev**

Department of Electronics

University of Ruse "Angel Kanchev"

Ruse, Bulgaria

E-mail: bevstatiev@uni-ruse.bg

**Abstract:** Globally electricity consumption is constantly increasing. To meet growing needs, new capacities are being built, with renewable energy sources and nuclear power plants emerging as the most promising. Photovoltaic power plants occupy a much larger share and future electricity prices largely depend on their efficiency. The main reason for their performance degradation during operation is potentially induced degradation (PID). To compensate for this degradation, several methods are known, one of which is reconfiguring the connections in the string of photovoltaic (PV) panels. An IoT-based electronic system has been developed for its application at RU "Angel Kanchev". The object of this article is to present the results of the experimental verification of the operability of this system and the possibilities of application in operating PV power plants.

**Keywords:** IoT, PID, photovoltaic power plants, LoRa.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Важен параметър на фотоволтаичните панели е намаляването на КПД по време на работа. Причината е потенциално индуцирана деградация, известна като PID. Причината за нея е миграцията на натриеви йони от покривните стъкла на панелите в кристалната силициева решетка на фотоклетките под действието на слънчевата радиация, високи температури, влажност и високи електрически потенциали (Pingel, S.; Kuncoro, M., 2019; Chandril, S., 2021; Luo, W., 2017; Hoffmann, S., 2014). Познати са няколко метода за нейната частична компенсация, като при някои от тях се постига възстановяване до 98% от първоначалната производителност на панелите (Kwembur1, I.; Pingel, S.; Bouaichi, A., 2016). В РУ "Ангел Кънчев" е разработена IoT-базирана електронна система за компенсиране на PID деградация, прилагаща преконфигурация на кабелните връзки в стринга на фотоволтаичните панели, която променя свързаността така, че най-близките до отрицателния вход на инвертора панели да станат най-близки до положителния вход на инвертора. Тази преконфигурация става по команда от управляващ компютър чрез комуникация между IoT слейв контролери и мастер контролер. Слейв контролерите са монтирани на всеки фотоволтаичен панел от стринга, а комуникацията става безжично чрез LoRa протокол на разстояния до 10 км.

---

<sup>9</sup> Докладът е представен на 25 октомври 2024 г. в секция „Електротехника, електроника и автоматика“ с оригинално заглавие на български език: ПРИЛОЖЕНИЕ НА IOT-БАЗИРАНА СИСТЕМА ЗА КОМПЕНСАЦИЯ НА ПОТЕНЦИАЛНО-ИНДУЦИРАНА ДЕГРАДАЦИЯ

## ИЗЛОЖЕНИЕ

### Опитна постановка

Експерименталната проверка на IoT-базирана електронна система за компенсиране на PID е проведена в действаща ФВЕЦ в експлоатация от март 2018г. с мощност 30 kWp, намираща се в гр. Килифарево, община В. Търново, област В. Търново – фиг. 1.



Фиг. 1. Фотоволтаична централа 30 kWp в гр. Килифарево

ФВЕЦ се състои от 96 броя фотоволтаични панели тип LX – 400M с мощност 400 Wp, производство на немската фирма LUXOR и инвертор 30 kW SUN2000-33KTL-A. Инверторът има 4 двойни входа, към които са присъединени стрингове от по 12 броя панели – фиг. 2. За целите на изследването са монтирани 12 броя слейв модеми за компенсиране на PID деградация на всеки панел от стринга PVA2, един слейв модем на входа на инвертора и един мастер модем за безжична връзка със слейв модемите и управляващия компютър – фиг. 3, 4, 5.

#### SUN2000-33KTL-A

|                                       |               |
|---------------------------------------|---------------|
| Maximum input power (cosφ = 1)        | 30,600 W      |
| Maximum input current (per MPPT)      | 22 A          |
| Highest operating voltage             | 1000 V        |
| Full power MPPT voltage range         | 480–800 V     |
| Rated /номинален/ input voltage 520 V |               |
| MPPT Voltage Range                    | 200 V ~ 1,000 |

#### LX - 400M/158-144+ | 400 = Rated power Pmpp

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| Electrical data at STC*            |        |
| Rated power Pmpp [Wp]              | 400.00 |
| Pmpp range to                      | 406.49 |
| Rated current Impp [A]             | 9.65   |
| Rated voltage Vmpp [V]             | 41.47  |
| Short-circuit current Isc [A]      | 10.19  |
| Open-circuit voltage Uoc [V]       | 50.14  |
| Efficiency at STC up to            | 20.18% |
| Efficiency at 200 W/m <sup>2</sup> | 19.62% |

| Север |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| МК-4  | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| МК-3  | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| МК-2  | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| МК-1  | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |

#### Легенда:

| Юг                       |            |                                                                   |
|--------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------|
| МК – Метална конструкция |            |                                                                   |
| PVA1                     | Стринг 1.1 | 12бр. без засенчване                                              |
| PVA2                     | Стринг 1.2 | 12бр. без засенчване                                              |
| PVA3                     | Стринг 2.1 | 12бр. без засенчване                                              |
| PVA4                     | Стринг 2.2 | 12бр. без засенчване                                              |
| PVA5                     | Стринг 3.1 | 12бр. с малко засенчване през зимата                              |
| PVA6                     | Стринг 3.2 | 12бр. с малко засенчване през зимата                              |
| PVA7                     | Стринг 4.1 | 12бр. с малко засенчване сутрин и засенчване следобед през зимата |
| PVA8                     | Стринг 4.2 | 12бр. със засенчване сутрин                                       |

Фиг. 2. Разположение на фотоволтаичните панели и разпределение по входовете на инвертора



Фиг. 3. Общ вид на експерименталната постановка



Фиг. 4. Общ вид на експерименталната постановка

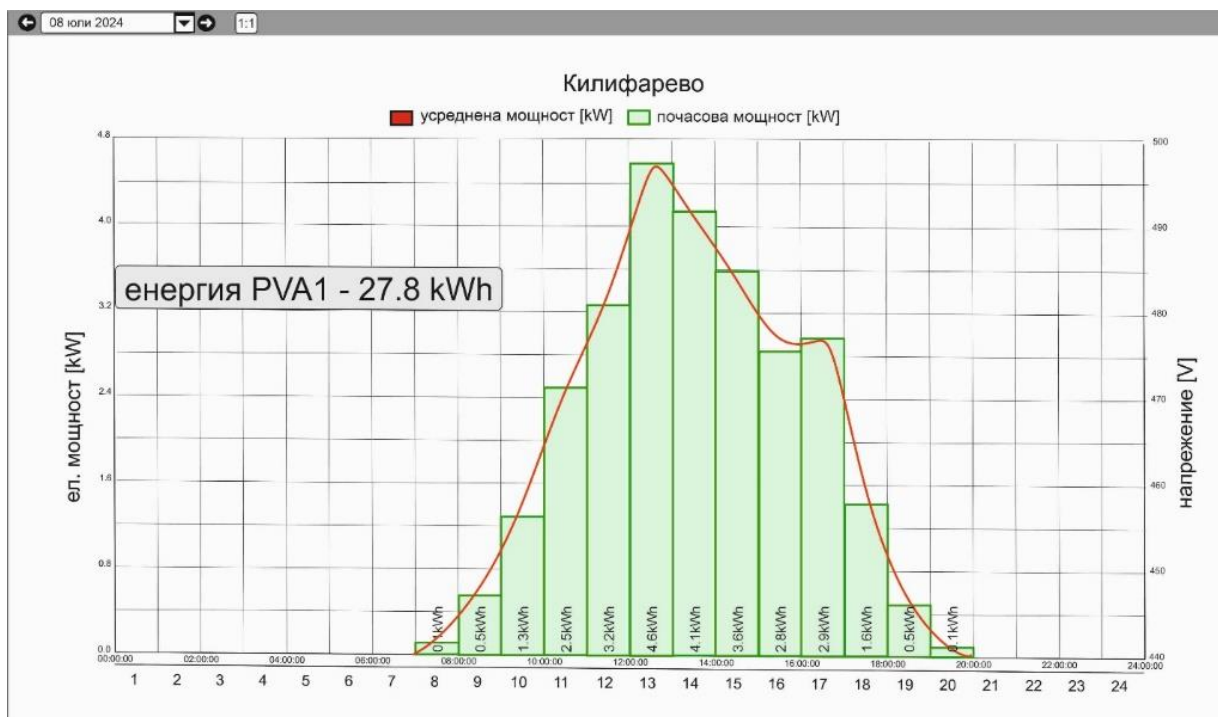


Фиг. 5. Общ вид на експерименталната постановка

### Методика на изследването

Методът на експерименталното изследване е сравнение на произведената електроенергия за период от 41 дни през месец юли и август 2024г. от два идентични стринга с по 12 броя PV панели, намиращи се на метална конструкция МК3 и МК4 от фиг. 2. Информацията за произведената енергия се сменя от интерфейса на инвертора SUN2000-33KTL-A, който дава графична и числова почасова стойност за постъпилата на входовете му енергия. Времето за работа на ФВЕЦ през деня е около 13 часа. Следователно обемът на информацията е  $41 \times 13 = 533$  стойности на произведена енергия, мерена в kWh, за всеки от двата стринга. Такъв обем на извадката дава възможност за обективна оценка на очакваната разлика в работата на двата стринга и проверка на работоспособността на разработената IoT-базирана електронна система за компенсиране на PID деградация. Информацията получавана от инвертора има вида, показан на фиг. 6, и нейната обработка е реализирана с вграден в Microsoft Excel инструмент за статистическа обработка DATA Analysis.



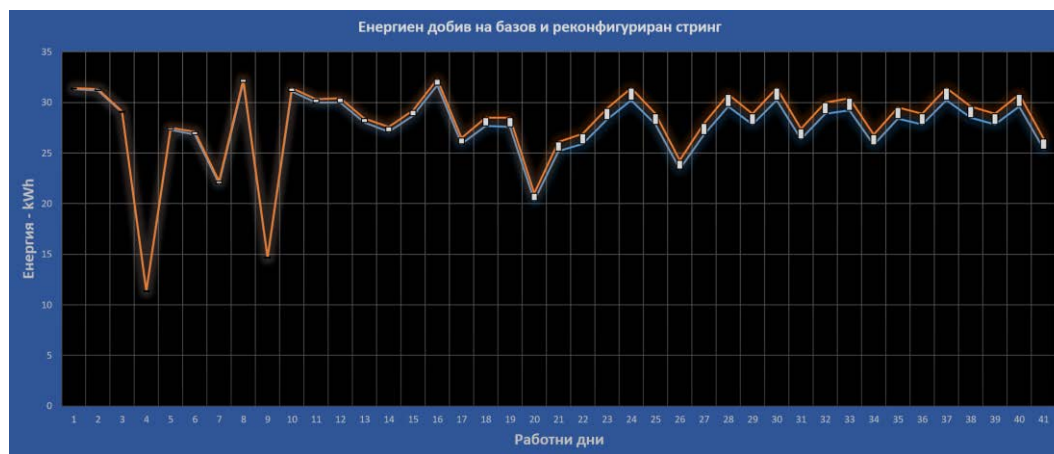


Фиг. 6. Общ вид на информацията, получавана от стринговия инвертор

IoT-базирана електронна система за компенсиране на PID деградация е активирана на 1-ви юли в 22:00 ч. и е работила 30 дни, след което е изключена. След 5 дни на 5-ти август в 22:00 ч. пак е включена, след което е изключена на 11-ти август в 22:00 ч. Получените резултати са показани в Таблица 1, а графичното им представяне – на фиг. 7. Сравнението на данните, получени от еталонния стринг МК4 и опитния МКЗ, показва, че през първата седмица не се наблюдава съществена промяна в работата на двата стринга. Разликата е около 0,8%. През втората седмица започва постепенно увеличаване на произведената ел. енергия от опитния стринг до 1,5% в повече от еталонния. През третата и четвърта седмица разликата в производството достига 3,8%. Отчитайки факта, че ФВЕЦ Килифарево е активирана през март 2018 г. и е в експлоатация от 5 години, е нормално да се отчита вече проявила се PID деградация, която по данни на производителя за конкретния модел фотоволтаични панели е около 20% за 25 годишния им експлоатационен живот, т.е. около 4%. След изключването за 5 дни на компенсаторите на PID деградация не се наблюдава спад в производителността на опитния стринг. След ново активиране на компенсаторите за 6 дни също не се наблюдава промяна в производителността и може да бъде заключено, че компенсирането на PID деградацията на фотоволтаичните панели от опитния стринг е достигнало своята максимална стойност – около 3,8%.

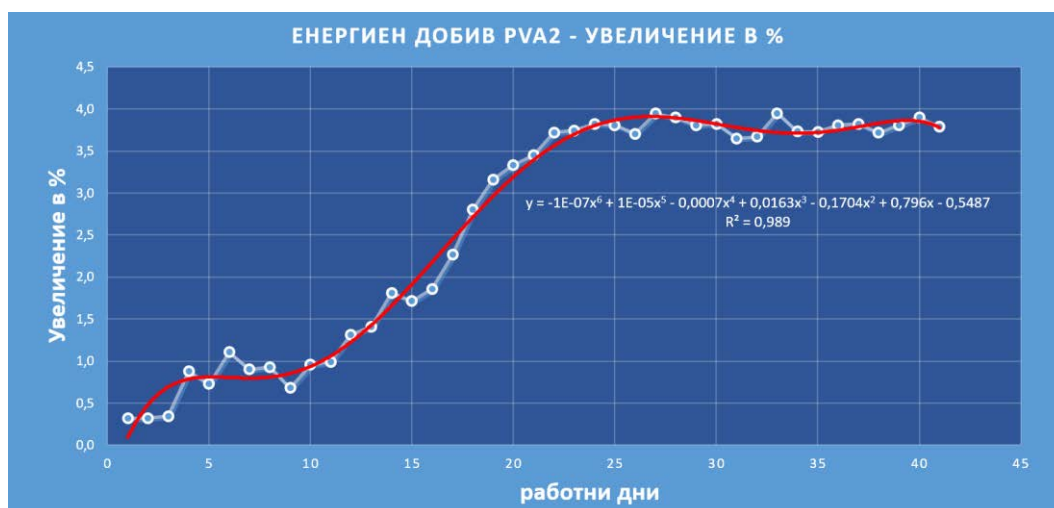
Таблица 1. Резултати от проведените опити

| ден      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   |      |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| PVA1     | 31.3 | 31.2 | 29   | 11.3 | 27.3 | 26.8 | 22   | 32   | 14.6 | 31.1 | 30   | 30   | 28   | 27.1 | 28.2 | 31.7 | 25.9 | 27.7 | 27.6 | 20.3 |      |
| PVA2     | 31.4 | 31.4 | 29.2 | 11.4 | 27.5 | 27.1 | 22.2 | 32.4 | 14.7 | 31.4 | 30.3 | 30.4 | 28.4 | 27.6 | 29.2 | 32.3 | 26.5 | 28.5 | 28.5 | 21   |      |
| Разлика% | 0.3  | 0.3  | 0.3  | 0.9  | 0.7  | 1.1  | 0.9  | 0.9  | 0.7  | 1.0  | 1.0  | 1.3  | 1.4  | 1.8  | 1.7  | 1.9  | 2.3  | 2.8  | 3.2  | 3.3  |      |
| ден      | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   | 31   | 32   | 33   | 34   | 35   | 36   | 37   | 38   | 39   | 40   | 41   |
| PVA1     | 25.2 | 25.9 | 28.3 | 30.2 | 27.8 | 23.4 | 26.8 | 29.6 | 27.8 | 30.2 | 26.4 | 28.9 | 29.2 | 25.8 | 28.4 | 27.8 | 30.2 | 28.5 | 27.8 | 29.6 | 25.4 |
| PVA2     | 26.1 | 26.9 | 29.4 | 31.4 | 28.9 | 24.3 | 27.9 | 30.8 | 28.9 | 31.4 | 27.4 | 30   | 30.4 | 26.8 | 29.5 | 28.9 | 31.4 | 29.6 | 28.9 | 30.8 | 26.4 |
| Разлика% | 3.4  | 3.7  | 3.7  | 3.8  | 3.8  | 3.7  | 3.9  | 3.9  | 3.8  | 3.8  | 3.6  | 3.7  | 3.9  | 3.7  | 3.7  | 3.8  | 3.8  | 3.7  | 3.8  | 3.9  | 3.8  |



Фиг. 7. Сравнение на произведената енергия от еталонния и опитния стринг

С помощта на вградените в Microsoft Excel функции за обработка на данни е определен математическият модел, описващ най-точно процеса на компенсиране на PID деградация в конкретната опитна постановка. Проверени са линеен модел, логаритмичен, полиномен от втори ред и полиномен от шести ред:  $y = -1E-07x^6 + 1E-05x^5 - 0,0007x^4 + 0,0163x^3 - 0,1704x^2 + 0,796x - 0,5487$  (фиг. 8), който най-точно описва процеса. Коефициентът на детерминация е  $R^2 = 0,989$ , а на корелация  $R = 0,994$ , т.е. почти единица.



Фиг. 8. Полиномен модел от шести ред на компенсиране на PID деградация

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Експерименталната проверка на работоспособността на разработената в РУ “Ангел Кънчев” IoT-базирана електронна система за компенсатори на PID деградация показва нейната работоспособност в реални условия. Получените резултати корелират с очакваните. Ефектът от прилагането на компенсатори на PID деградация е най-силно проявен до 25-ти ден от тяхното включване. След този период не се наблюдава повишаване на енергийния добив. Математическият модел, описващ най-точно процеса на компенсиране на PID деградацията в конкретния случай, е полином от шеста степен  $y = -1E-07x^6 + 1E-05x^5 - 0,0007x^4 + 0,0163x^3 - 0,1704x^2 + 0,796x - 0,5487$  с коефициент на корелация  $R = 0,994$ .

## ACKNOWLEDGMENT

Настоящото изследване е финансирано по проект 2024-EEA-02 „Разработване и изследване на фотоволтаична система, ذخхранваща сензорни устройства в оранжерии“.

## REFERENCES

- Bouaichi, A., Merrouni, A. A., Hajjaj, C., Messaoudi, C., Ikken, B., Amrani, A. E., ... & Ghennioui, A. (2019). *Experimental investigation of potential induced degradation (PID) impact and recovery on crystalline photovoltaic systems*. In Proceedings of the 1st International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy: ICEERE 2018, 15-17 April 2018, Saidia, Morocco 1 (pp. 623-629). Springer Singapore.
- Chandril, S., & PVV, R. S, R.(2021). *On-site Detection and Mitigation of Potential Induced Degradation at Photovoltaic Power Plants–Case Study*. Academia Letters.
- Hoffmann, S., & Koehl, M. (2014). *Effect of humidity and temperature on the potential-induced degradation*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 22(2), 173-179.
- Kuncoro, M., Darussalam, R., Sukmono, C. B., & Garniwa, I. (2019, September). *Dynamic Power Injection for Solar PV Constant Power Generation*. In 2019 6th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE) (pp. 1-5). IEEE.
- Kwembur, I. M., McClelland, J. C., Vorster, F. J., & van Dyk, E. E. (2020). A case study on monitoring Potential Induced Degradation (PID) recovery in multi-crystalline modules. Nelson Mandela University, Port Elizabeth, South Africa.
- Luo, W., Khoo, Y. S., Hacke, P., Naumann, V., Lausch, D., Harvey, S. P., ... & Ramakrishna, S. (2017). *Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review*. Energy & environmental science, 10(1), 43-68.
- Luo, W., Hacke, P., Singh, J. P., Chai, J., Wang, Y., Ramakrishna, S., ... & Khoo, Y. S. (2016). *In-situ characterization of potential-induced degradation in crystalline silicon photovoltaic modules through dark I–V measurements*. IEEE Journal of Photovoltaics, 7(1), 104-109.
- PID - The Problem and How to Solve it*, online: <http://files.sma.de/dl/7418/PID-PVOBox-TI-en-10.pdf>, accessed 14/03, 2016
- Pingel, S., Frank, O., Winkler, M., Daryan, S., Geipel, T., Hoehne, H., & Berghold, J. (2010, June). *Potential induced degradation of solar cells and panels*. In 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 002817-002822). IEEE.
- Pingel, S., Janke, S., & Frank, O. (2012, September). *Recovery methods for modules affected by potential induced degradation (PID)*. In 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (pp. 3379-3383).
- PV data - LX - 400M* Online: <https://www.luxor.solar/en/solar-modules/eco-line-gg/heterojunction-glass-glass-bifacial-modules.html>