

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Зеленые» кадры решают все. – URL: <https://xn----glcfcctdci4bhow0as6psb.xn--p1ai/novosti/zelenye-kadry-reshayut-vse/> (дата обращения 01.11.2023).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 29.08.2020 г. № 1298
3. «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок “Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики”». Приказ Министерства энергетики РФ от 12 июля 2018 г. N 548
4. Hannan A.M., Ammar A.A., Pin J.K. Power Quality Assessment of Grid-Connected PV System in Compliance with the Recent Integration Requirements, 2020.

## ВЛИЯНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ВИЭ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЭС

**А.В. Десятов**

*Томский политехнический университет,  
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А03*

Научный руководитель: Ю.Д. Бай, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В соответствии с мировым технологическим прогрессом в области возобновляемых источников энергии интеграция производства электроэнергии с использованием энергии солнца и ветра в национальную энергосистему очень важна, поскольку это будет способствовать снижению зависимости от внешних источников энергии и созданию экономически оправданных альтернатив, позволяющих сократить общие расходы на электроэнергию без каких-либо негативных последствий для энергоэффективности и местного населения.

### Актуальность для России

Значительная часть территорий России, в особенности районы Дальнего Востока, Арктики и Крайнего Севера, а также малые поселения и районы с низкой плотностью населения, не имеют централизованного энергоснабжения. Главной причиной является невыгодность экономической стороны постройки линий электропередач, это вызвало проблемы с энергетическим обеспечением этих районов. Развитие возобновляемой энергетики, в том числе использование солнечной энергии, является одним из способов решения этой проблемы.

### Темпы внедрения

В РФ был принят федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов», а также утверждена Стратегия социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, согласно которой реализация целевого сценария позволит Российской Федерации достичь баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением не позднее 2060 года.

В 2021 году Правительством РФ принято решение о продлении программы поддержки возобновляемой энергетики (ДПМ ВИЭ 2.0). Целевой объём ввода СЭС составляет 3,5 ГВт, который планируется достичь уже к 2035 году.

### Постановка задачи

По сравнению с традиционными турбинными установками, солнечные имеют иные технические характеристики. При их подключении они создают дополнительные проблемы

поддержания устойчивости систем электропередачи как при нормальной работе, так и в случае аномальных возмущений. Соответственно, ожидаемые сценарии работы, должны быть заранее определены и изучены для поддержания устойчивости сети электропередачи и поддержания поставок в течение дня и ночи.



Рис. 1. Основные параметры будущей программы поддержки ВИЭ на период 2025–2035 гг.

### Влияние внедрения СЭС

В отличие от источников энергии на базе синхронных генераторов, солнечные электростанции (СЭС) отделены от сети и не оказывают ей инерционной поддержки, так как взаимодействуют с сетью через силовые электронные инверторы. Снижение инерционности энергосистемы может привести к возникновению ряда эксплуатационных проблем и вопросов для операторов энергосистем, особенно в части стабильности частоты и напряжения. Сеть становится более восприимчивой к таким событиям, как внезапная потеря генерации, изменение нагрузки, короткое замыкание, а также способность сети реагировать и останавливать изменения частоты после возмущения снижается. В свою очередь, возрастает риск нестабильности частоты сети и каскадных сбоев.

Помимо проблем со стабильностью частоты, к числу других значимых проблем, связанных с малоинерционной энергосистемой, относятся низкий коэффициент короткого замыкания и прочность системы, изменение настроек защитных устройств, снижение способности к прохождению КЗ. Дополнительная инерционность и быстрая поддержка частоты станут необходимыми для обеспечения масштабного проникновения возобновляемых источников энергии в энергосистему.

### Используемая модель

С целью исследования влияния ВИЭ на режимы ЭЭС смоделируем поведение системы с помощью создания схемы замещения солнечной панели в программе Matlab Simulink. На данный момент известно большое количество математических моделей СП, однако в рамках данной работы будет использоваться эквивалентная двухдиодная модель, считающаяся наиболее достоверной и распространённой. Представленная двухдиодная модель фотоэлектрического модуля (рис. 2) показывает аналогичные результаты в рамках стандартных условий.

Данная модель описывается следующим уравнением:

$$I_c = I_p - I_{d1} \exp\left(\frac{e(U_c + I_c R_{ш})}{n_1 k T}\right) - I_{d2} \exp\left(\frac{e(U_c + I_c R_{ш})}{n_2 k T} - \frac{(U_c + I_c R_{ш})}{R_{ш}}\right),$$

где  $I_p$  – фототок,  $I_{d1}$  – ток протекающий через неидеальный p-n-переход,  $I_{d2}$  – обратный ток насыщения.

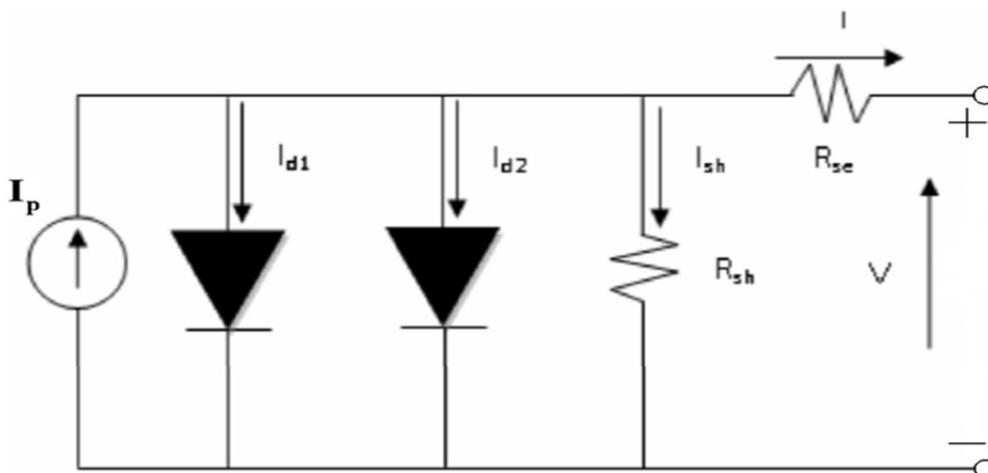


Рис. 2. Схема замещения солнечного элемента

Сбор модели осуществлялся согласно приведённому математическому уравнению в программном комплексе Matlab. Модель в Matlab собрана в виде следующих блоков: блок фототока, блоки диодных токов, блок тока через шунтирующее сопротивление, решающий блок Solve. Также для создания модели использовались блоки умножения и сложения.

Основные блоки модели представлены на рис. 3.

С целью дальнейшего исследования влияния СЭС на характеристики ЭЭС была реализована описанная выше математическая модель солнечных панелей Kyocera KC130TM в программном комплексе MATLAB Simulink. Реализованная математическая модель с допустимой степенью адекватности воспроизводит ВАХ СП. ВАХ двухдиодной математической модели практически совпадает с ВАХ СП в точках ХХ и КЗ. В дальнейших исследованиях будем полагать, что данная модель является эталонной.

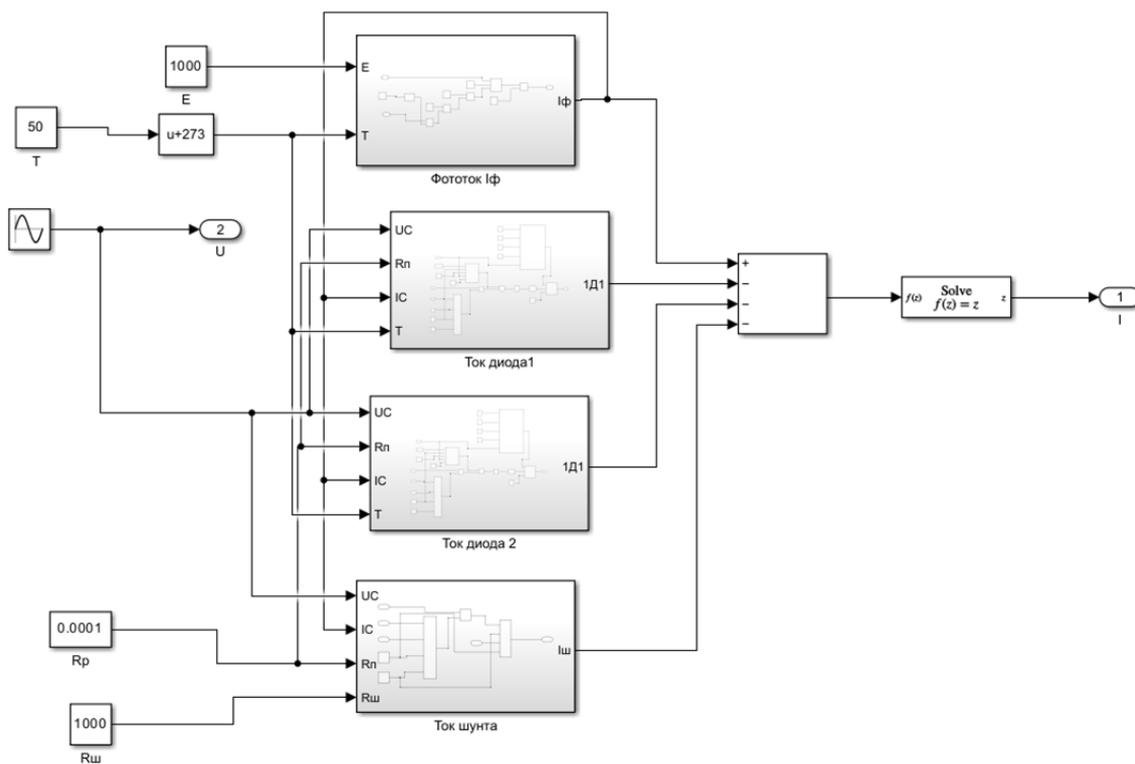


Рис. 3. Схема математической модели солнечной панели

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eftekharijad S., Vittal V., Heydt G.T., Keel B., Loehr J. Impact of Increased Penetration of Photovoltaic Generation on Power Systems // IEEE Transactions on Power Systems. – 2013. – Vol. 28. – Iss. 2. – P. 893–901. – URL: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2216294>
2. Renewables 2019 Global Status Report // Ren21.Renewables now. – URL: [https://www.ren21.net/gsr2019/chapters/chapter\\_03/chapter\\_03/](https://www.ren21.net/gsr2019/chapters/chapter_03/chapter_03/) (01.11.2023).
3. Nema S., Nema R.K., Agnihotri G. MATLAB/Simulink based study of photovoltaic cells /modules / array and their experimental verification // International journal of Energy and Environment. – 2010. – Vol. 1. – No. 3. – P. 487–500.
4. Abd Alrahim Shannan N.M., Yahaya N.Z., Singh B. Single-Diode Model and Two-Diode Model of PV Modules: A Comparison. In: Control System, Computing and Engineering: International Conference. 2013. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6719960> [Accessed 27th February 2020].
5. Российский союз промышленников и предпринимателей / Программа поддержки ВИЭ на период 2025–2035 гг. Руководитель инвестиционного дивизиона ВИЭ ООО «УК «РОСНАНО» А.Б. Каланов. – URL: <file:///C:/Users/%D0%90%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B5%D0%B9/Downloads/2502ae1262d70e4e020677e29ad60c23-2.pdf>
6. Kyocera KC130TM Solar Panel // SOLAR ELECTRIC SUPPLY, INC. – URL: <https://www.solarelectricsupply.com/kyocera-kc130tmsolar-panel> [01.11.2023]

## РОЛЬ АВТОМАТИЗАЦИИ И КОНТРОЛЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ В УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

**Б.Б. Холихматов**

*Ташкентский государственный технический университет,  
ЭЭ, ЭС*

Научный руководитель: И.У. Рахмонов, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой ЭС ТГТУ

В данной статье рассматривается актуальная проблема несимметрии напряжения в электроснабжении сталеплавильных предприятий. Несимметрия напряжения, вызванная неравномерным распределением нагрузки и неисправностями в электрооборудовании, может привести к серьезным повреждениям оборудования и снижению качества производимой стали. В статье рассмотрены причины несимметрии напряжения, а также подробно рассмотрены стратегии автоматизации и контроля этого явления, включая математическое моделирование, алгоритмы машинного обучения и системы управления энергопотреблением. Освещены выгоды от внедрения систем автоматизации и контроля, такие как стабильность производства, снижение эксплуатационных расходов и улучшение качества продукции. Также рассмотрены перспективы развития данной области и возможности для инноваций в сталеплавильной промышленности.

**Ключевые слова:** Несимметрия напряжения, сталеплавильные предприятия, автоматизация, контроль, электроэнергия.

### Введение

В эпоху стремительных технологических изменений и постоянного роста потребительского спроса, сталеплавильные предприятия сталкиваются с новыми вызовами и возможностями. Одним из ключевых аспектов, определяющих эффективность сталеплавильных процессов, является качество и стабильность электроэнергии. В данной статье мы рассмотрим не только технические аспекты несимметрии напряжения в сталеплавильных печах, но и углубимся в роль автоматизации и контроля, предоставив всесторонний анализ современных инноваций в данной области [5].