

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Д.И. Муравьев, магистрант

Научный руководитель: Б.В. Лукутин, д.т.н., профессор

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

г. Томск, Россия

pro\_sport\_085@mail.ru

Актуальность. Перспективным направлением повышения технико-экономических характеристик автономных систем электроснабжения является включение в их состав установок возобновляемой энергетики. Фотоэлектрические генераторы на базе распределенных источников являются оптимальными технологиями использования возобновляемых источников энергии в сетях низкого напряжения сети 0,4 кВ. Распространенным вариантом является гибридная система с фотоэлектростанциями, включенными в локальную сеть дизельной электростанции. Фотоэлектростанции (ФЭС) отвечают всем требованиям экологии и могут внести существенный вклад в электрификацию удалённых посёлков, туристических и сельскохозяйственных объектов. В работе рассмотрены вопросы стабилизации величины напряжения и сокращения потерь электрической энергии в зависимости от параметров элементов систем электроснабжения радиального типа (0,4 кВ), установленной мощностью до 100 кВт. Исследования проводились путем моделирования рабочих режимов гибридных систем электроснабжения различных конфигураций. Для анализа совместной работы фотоэлектростанции с дизельной электростанцией (ДЭС) на нагрузку создана математическая модель в приложении Simulink (SimPowerSystems) программы MatLab R2016b. В большинстве известных работ не отображены вопросы качества и потерь электроэнергии в автономной системе электроснабжения (АСЭС) с фотоэлектрической распределенной генерацией. В результате проведенных исследований получены рекомендации по снижению потерь и отклонений напряжений в локальной сети путем выбора мощности и мест подключения ФЭС [5,6,7,9,10].

Объект исследования. Рассматривается автономная система электроснабжения радиального типа напряжением 0,4 кВ, характерная для электрификации небольших поселков. Исследования проводились для географических условий средних широт территории Дальнего Востока России.

Цель исследования. Создание рабочей модели автономной системы электроснабжения с распределенной фотоэлектрической генерацией, где учитывается необходимость большого количества расчетов, связанных с суточными изменениями инсоляции и электропотребления. В частности, представляет интерес стабильность величины напряжения и потерь в линиях электропередачи в зависимости от соотношения мощностей ДЭС и ФЭС, точек присоединения фотоэлектростанций к автономной электрической сети [4].

Результаты работы. Для анализа гибридной работы ФЭС с дизельной электростанцией на нагрузку создана математическая модель в приложении Simulink программы MatLab R2016b, показанная на рис. 1. Для моделирования переходных процессов использовалась библиотека SimPowerSystems. Модель ФЭС создана на основе аппроксимированных характеристик фотоэлектрического генератора и упрощенных математических функций, что представлено в виде блока-субсистемы «Функция мощности от двух параметров». Расчетная эквивалентная схема радиальной сети 0,4 кВ включает в себя источник напряжения ЭДС, эквивалентирующий дизельную электростанцию с регулированием возбуждения синхронных

генераторов, блоки «Линия1,2» - индуктивные и активные сопротивления участков цепей до точек подключения потребителей в комплексной форме  $S_n$ . Потребители подключены через участки подводящих линий в блоках «Линия нагрузки1,2», характеризующие активно-индуктивный характер нагрузок. Фотоэлектростанция эквивалентруется источником тока в блоке «Источник переменного тока ФЭС», который может подключаться к различным точкам сети. Фотопанели, входящие в состав ФЭС, передают генерируемую мощность тока через сетевой инвертор. Современные инверторы с функциями MPPT по своим выходным характеристикам могут также эквивалентироваться источником тока блока «Источник переменного тока ФЭС» [8]. Влияние солнечного контроллера учтено в блоке «КПД контроллера». Совместная параллельная работа двух источников тока ДЭС и ФЭС обеспечивается за счет блока «ФАПЧ» - система автоматического регулирования, подстраивающая фазу управляемого источника тока (ФЭС) так, чтобы она была равна фазе опорного сигнала (ДЭС). Регулировка осуществляется благодаря наличию отрицательной обратной связи [8].

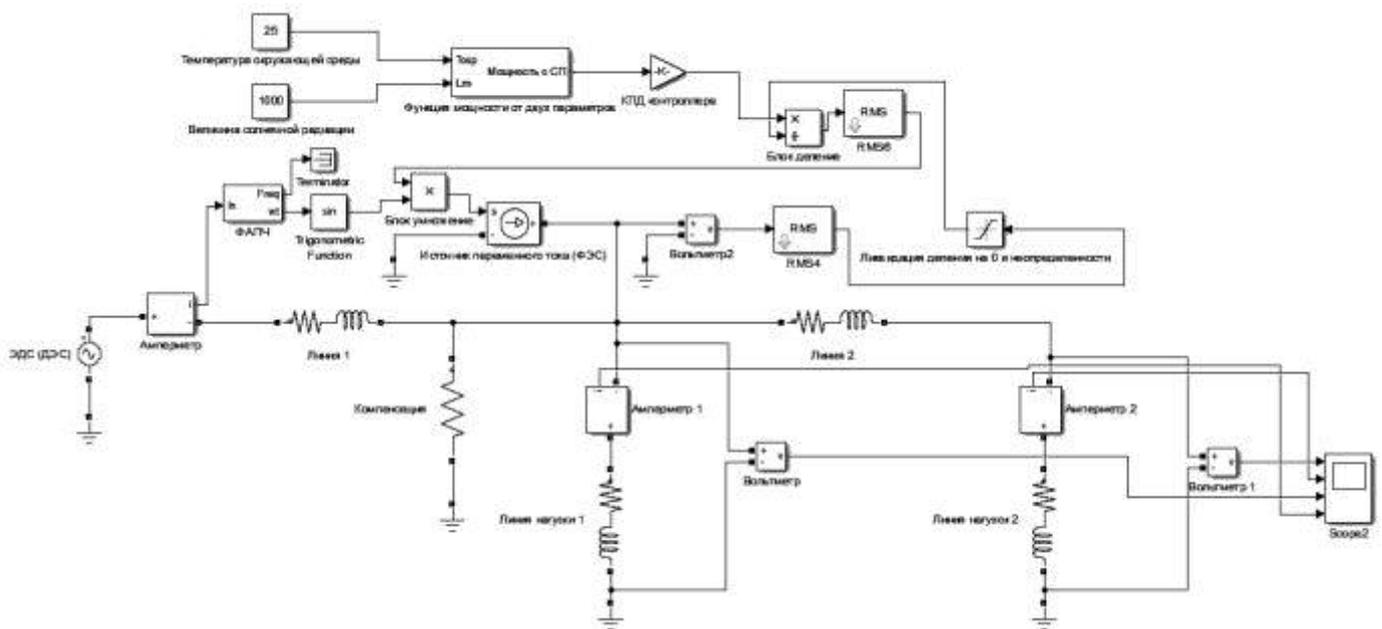


Рисунок 1. Математическая модель автономной системы электроснабжения с распределенной фотоэлектрической генерацией.

Протяженность линий электропередач ограничивается предельно допустимым отклонением напряжения на нагрузке в конце линии относительно номинального значения. Государственный стандарт устанавливает предельную величину этого отклонения не более 10%. Блок-субсистема «Функция мощности от двух параметров» описывает аналитическое выражение влияния температуры окружающей среды и величины интенсивности солнечного излучения, при расположении фотопанели перпендикулярно падающим лучам. Математическая модель блока-субсистемы представлена в приложении Simulink программы MatLab R2016b и показана на рис. 2 [8,9,10].

Уравнение функции генерации мощности солнечного модуля по параметрам температуры окружающей среды и интенсивности солнечного излучения [1]:

$$(I_{SC} \cdot U_{OC} \cdot (1 + (\alpha - \beta)) \cdot (T_E - T_0)) \cdot \lambda; \quad (1)$$

где  $I_{SC}$  – ток короткого замыкания солнечного модуля;  $U_{OC}$  – напряжение холостого хода солнечного модуля;  $\alpha$ ,  $\beta$  – соответствующие температурные коэффициенты;  $T_E$  –

температура окружающей среды;  $T_0$  – температура, принятая за базисную величину ( $20^{\circ}\text{C}$ );  $\lambda$  – интенсивность солнечного излучения.

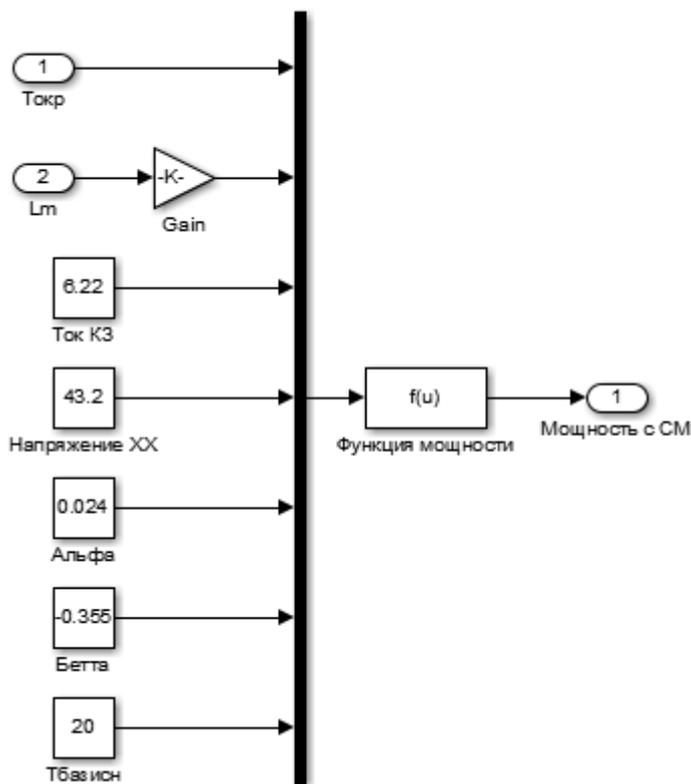


Рисунок 2. Математическая модель функции двух переменных солнечного модуля.

Пример моделирования установившегося режима параллельной работы ФЭС и ДЭС с активно-индуктивными нагрузками, типичными для сельской местности населением 50-1000 человек показан на рис. 3. Основными потребителями являются частные дома и социальные объекты: школы, библиотеки, клубы, детские сады и т.д. Объекты социальной среды являются более мощными потребителями электроэнергии, на которых и будет приходиться совместная генерация с фотоэлектростанцией. Максимальная мощность, потребляемая школой или клубом для рассматриваемых поселков, составляет 7-10 кВт [7,9,10].

В работе исследуется система электроснабжения для условий, соответствующих летнему сезону. Это прагматично, так как зимняя инсоляция в средней полосе Дальнего Востока России в 15 раз меньше летней. Это определяет создание ФЭС, которая будет эффективна именно для летнего сезона. Зимой с ростом электропотребления и снижением инсоляции роль ФЭС значительно снижается, и она практически не оказывает влияния на электрический режим системы электроснабжения [2].

Известно, что сетевой инвертор, эквивалентируемый источником тока блока «Источник переменного тока ФЭС», может работать параллельно только с достаточно мощной энергосистемой. В АСЭС такая энергосистема создается ДЭС. Ведущие производители «солнечных инверторов» не рекомендуют снижать текущую мощность дизельной электростанции в фото-дизельных системах менее чем до 60-70% относительно мощности суммарной генерации. ФЭС практически не добавляет своей мощности в утренний и вечерний максимумы нагрузки [6,7,8,10].

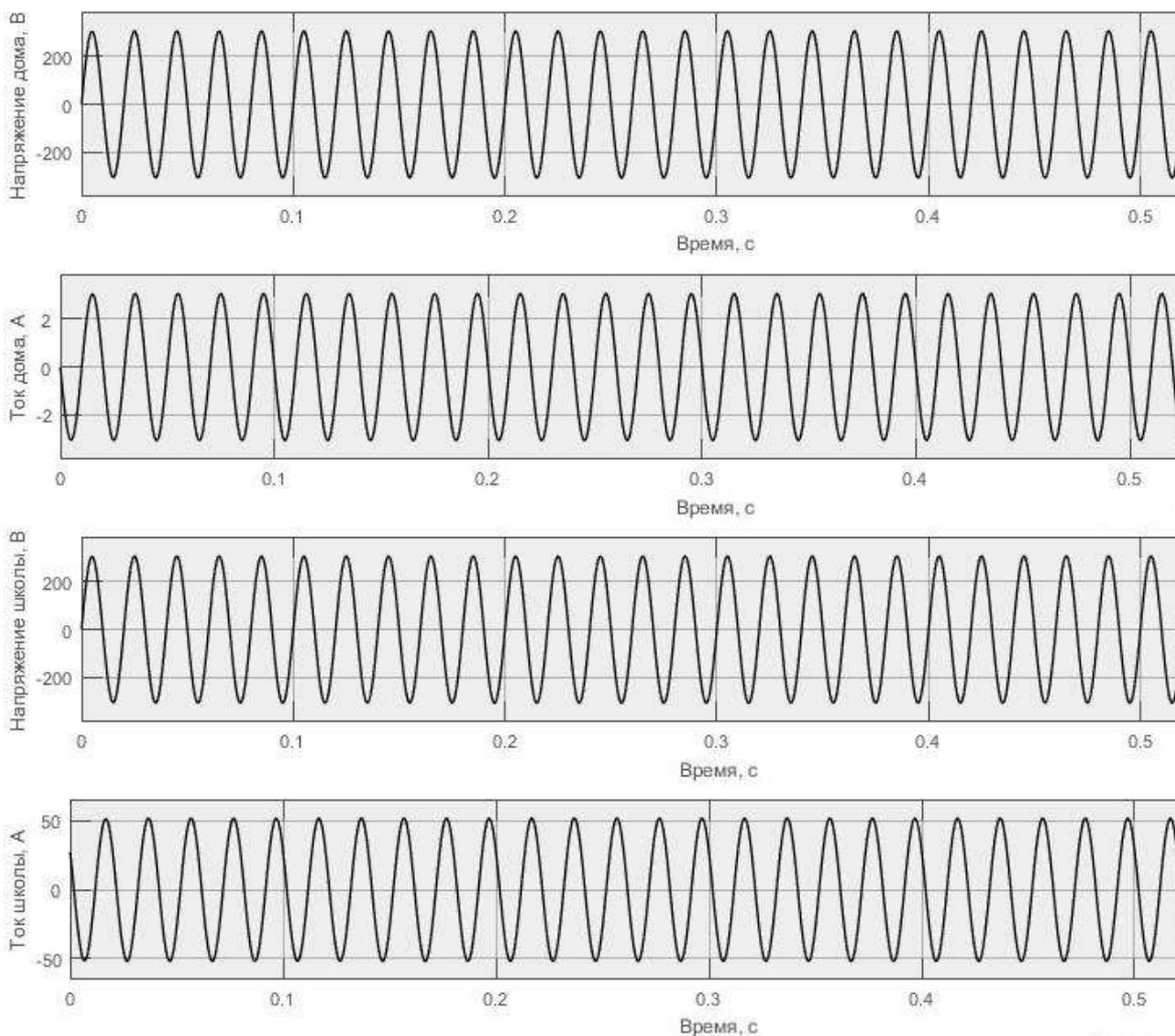


Рисунок 3. Графики токов и напряжений потребителей социальной сферы – школы и частного дома.

Точка подключения фотоэлектростанции к автономной электрической системе взаимодействует параллельно с ДЭС на общее распределительное устройство. Это позволяет экономить на распределительном устройстве и релейной защите. С точки зрения электрического режима распределительной сети, такое подключение не приводит к его изменению. В частности, потери электроэнергии и напряжения в линии электропередачи определяются величиной передаваемого тока и сопротивлением проводов. Подключение источника тока, эквивалентирующего ФЭС, в другие точки линии электропередачи приводит к перераспределению токов в электрической схеме и, как следствие, к изменению величин потерь электроэнергии и напряжений в точках подключения нагрузок [5,6].

В номинальном режиме работы ДЭС напряжение в конце исследуемой модели линии электропередачи снижается на 8,04 % относительно номинального рис. 5. Подключение дополнительного источника в виде фотоэлектростанции позволяет перераспределить мощность нагрузок между ДЭС и ФЭС. В результате происходит изменение величин токов на различных участках сети, что позволяет уменьшить потери электроэнергии в проводах и обеспечить большую стабильность напряжения в точках подключения потребителей электроэнергии [5].

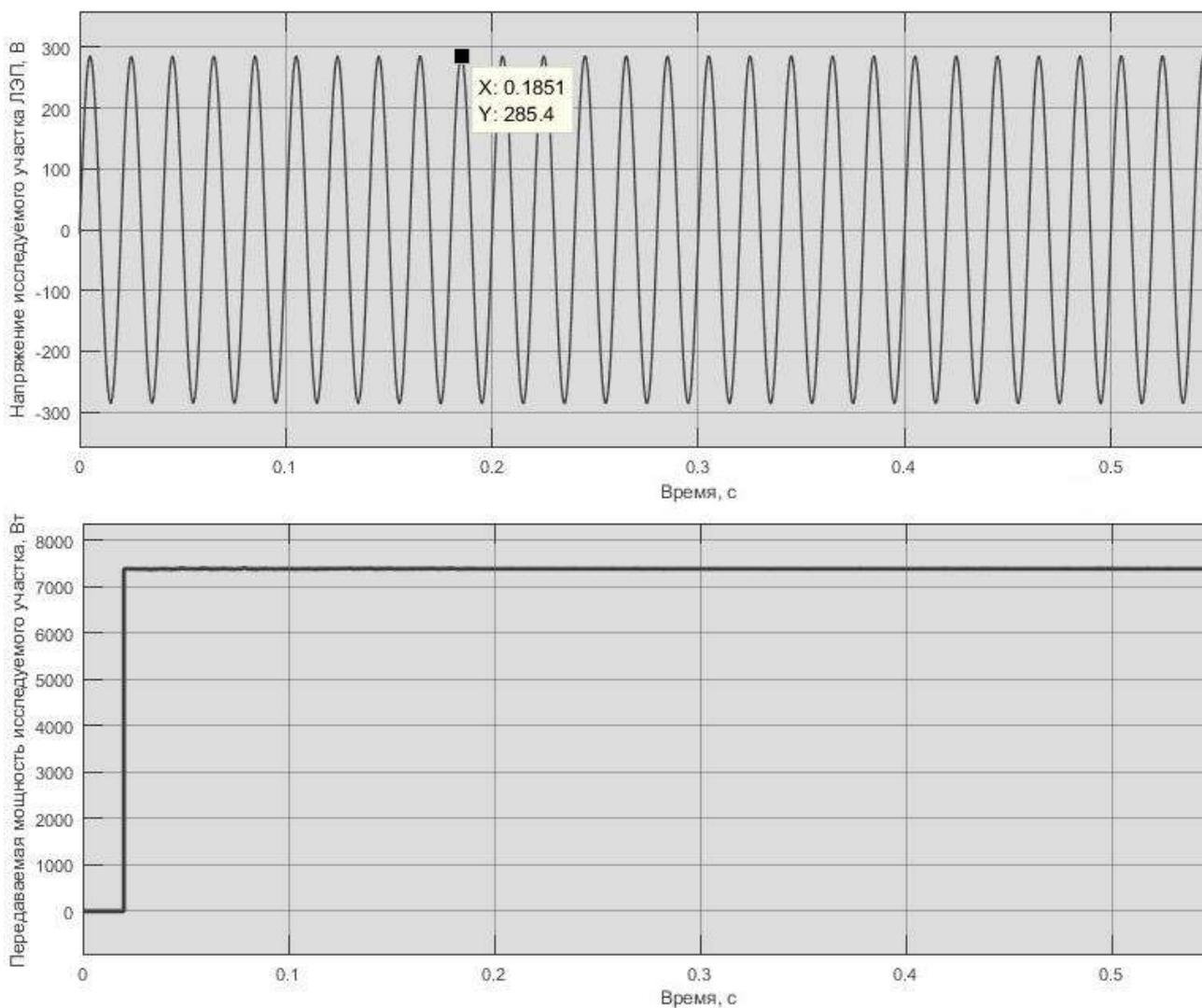


Рисунок 4. Напряжение и передаваемая мощность в конце моделируемой линии электропередачи без введения дополнительного энергоисточника ФЭС.

Полученные данные отражают потребление мощности рассматриваемыми объектами и генерацию токов в узлы электрической сети от основного источника ДЭС и вспомогательного ФЭС. Время, соответствующее значению 0,02 (сек.), определяет момент срабатывания блока «ФАПЧ» и блоков «RMS» для выхода на установившийся режим системы [5,9,10].

Результаты моделирования показали, что соответствующая мощность фотоэлектростанции, в зависимости от величины потребляемой нагрузки системы электроснабжения, позволяет сократить генерацию мощности от основного источника ДЭС, что влечет за собой уменьшение расходов и потребления топлива, разгрузку дизельного сегмента в летний период рис 5. При существенно неравномерной мощности нагрузок распределительной линии электропередач, ФЭС целесообразно подключать в точке подключения максимального по мощности электропотребителя [3].

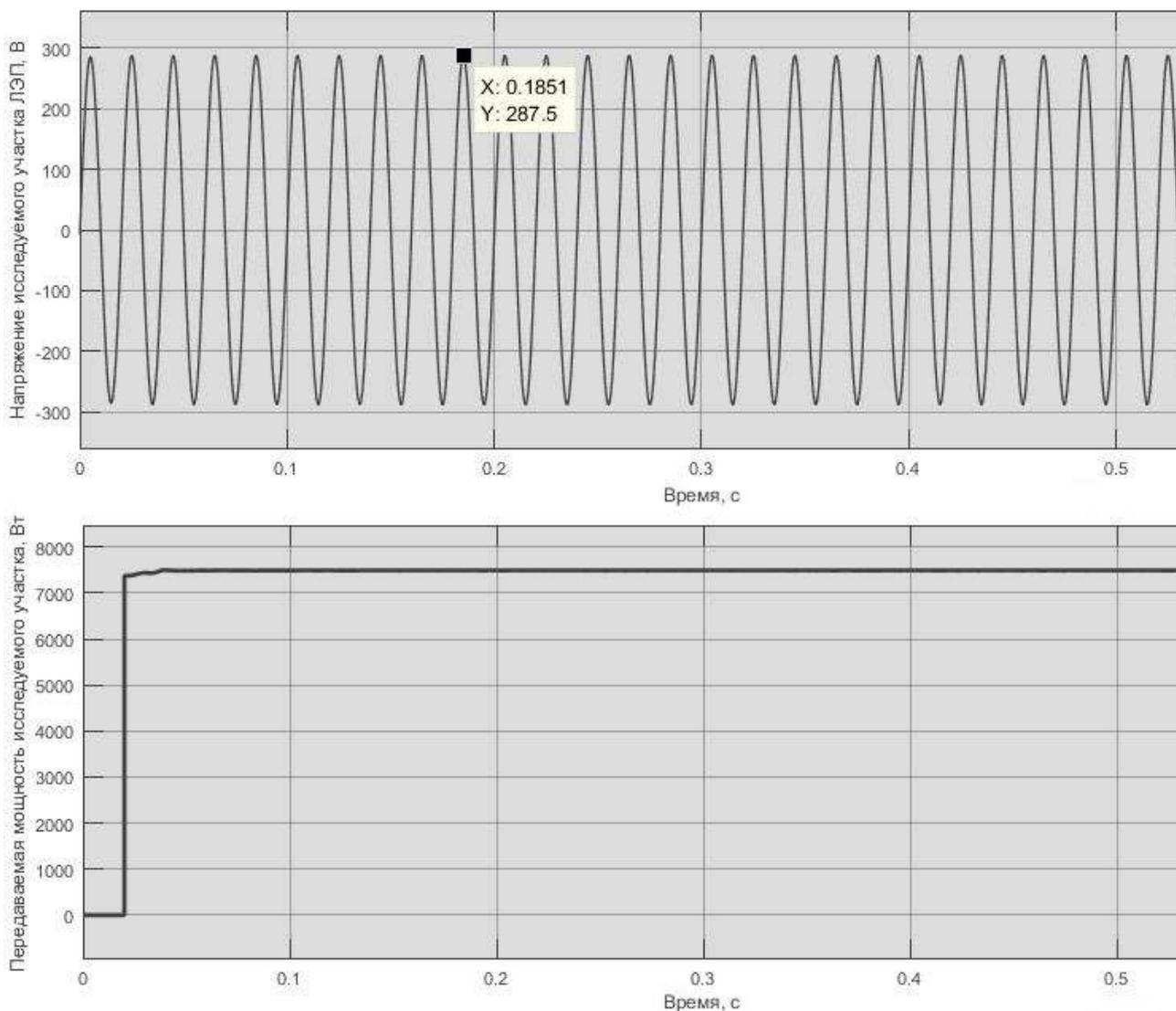


Рисунок 5. Напряжение и передаваемая мощность в конце моделируемой линии электропередачи с учетом дополнительного энергоисточника ФЭС.

### Заключение.

1. Эффективность применения ФЭС в автономных системах электроснабжения существенно ограничивается условиями солнечной инсоляции и температурных изменений. Присутствует необходимость использования накопителей электроэнергии.
2. Для географических районов в средних широтах северного полушария большая разница величины инсоляции летом и зимой определяет целесообразность максимального использования ФЭС летом, что противоречит снижению летнего электропотребления.
3. Для стабилизации напряжения в системе электроснабжения и сокращения потерь электроэнергии возможно использование ФЭС ближе к концу распределительной линии или к точке подключения самого мощного потребителя [5].
4. Данная модель АСЭС с распределенной фотоэлектрической генерацией показала удовлетворительные результаты моделирования. Модель позволяет проверить исследование различных режимов и конфигураций гибридных фото-дизельных

СЭС с целью стабилизации и сокращения потерь напряжения на исследуемых временных интервалах.

### Список литературы:

1. Возобновляемые источники энергии: Учебник/ С.Н. Удалов – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 432 с. + цв. вкл. – (Серия «Учебники НГТУ»).
2. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие / Б.В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.
3. Н.Н. Дураев, С.Г. Обухов, И.А. Плотников. Имитационная модель дизельного двигателя для исследования его рабочих характеристик на переменной частоте вращения // Известия Томского политехнического университета. – 2013 – №4. Т. 322. – С. 48-52.
4. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие/ Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 100 с.
5. Mehmet H. Cintuglu, Armando Altamirano, Osama A. Mohammed. Energy Systems Research Laboratory, ECE Department Florida International University Miami, USA // 12th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. – 2014. – P. 1–10.
6. Nasrudin Abd. Rahima Hew Wooi Pinga, Jeyraj Selvaraja. Photovoltaic module modeling using simulink/matlab// The 3rd International Conference on Sustainable Future for Human Security SUSTAIN 2012. – 2013 - Procedia Environmental Sciences №17 – P. 537 – 546.
7. Jose R. Rodriguez, Felipe Ruiz, Domingo Biel, Francesc Guinjoan. Simulation and analysis of distributed PV generation in a LV network using MATLAB-Simulink// The Spanish Ministry of Science and Innovation through the grants RUE CSD2009-00046, Consolider-Ingenio 2010 Programme, DPI2006-15627-C03-01 and DPI2007-62582.
8. B V Lukutin, E B Shandarova, A F Makarova and I B Shvartsman. Effect of Distributed Photovoltaic Generation on the Voltage Magnitude in a Self-Contained Power Supply System//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 127. – 2016 – National Research Tomsk Polytechnic University.
9. Local Energy Distributed generation of heat and power: Publication/Janet Wood – Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2008. – 205 p. ISBN 978-0-86341-739-9.
10. K.Amaresh, V.Sankar. Modeling of Photovoltaic System Interconnected with Radial Distribution System using MATLAB/SIMULINK// International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). – September 2013 – ISO 9001:2008 Certified.