

УДК: 621.311.1

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЙ В ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ, РАБОТАЮЩИХ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСАХ

Гайибов Тулкин Шерназарович¹-доктор технических наук, профессор,
ORCID: 0000-0003-3619-2844, E-mail: tulgayibov@gmail.com
Тошев Тажиддин Унгбоевич² – старший преподаватель,
ORCID: 0000-0001-9260-5151, E-mail: tojiddin20.02.85@gmail.com

¹Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, Узбекистан
²Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Узбекистан

Аннотация. В современных условиях интенсивного повышения электропотребления во всех сферах человеческой деятельности, ограниченности запаса углеводородного топлива, а также остроты экологических проблем энергетики требуется разработка и внедрение более эффективных методов строительства и эксплуатации электростанций, работающих на возобновляемых энергоресурсах, в первую очередь, на энергии солнца и ветра. Проектирование автономных гибридных систем со станциями, использующими такие энергоресурсы, предусматривает, в частности, выбор оптимального состава основного оборудования. Несмотря на существование в настоящее время ряд разработок по решению этой проблемы, вопросы их усовершенствования посредством учета всех ограничивающих и влияющих факторов, повышения точности оптимизации, остается актуальной задачей. В данной работе предлагается эффективная математическая модель и алгоритм выбора оптимального состава оборудования в автономных гибридных системах, содержащих солнечные и ветровые станции, а также аккумуляторных батарей, с учетом всех факторов. Предлагаемый алгоритм предусматривает решение задачи приведением её к задаче линейного программирования и использованием симплексного метода. Приведены результаты исследования эффективности предложенной модели и алгоритма оптимизации. По результатам выполненных расчетных экспериментов выявлено, что предложенная модель и алгоритм оптимизации состава оборудования в автономной гибридной системе обладает хорошим вычислительным качеством и высокой точностью расчета.

Ключевые слова: оптимизация, математическая модель, алгоритм, автономная система, гибридная система, фотоэлектрическая станция, ветровая электростанция, солнечный модуль, ветровой агрегат, капиталовложение, эксплуатационные затраты.

UO‘K: 621.311.1

QAYTA TIKLANUVCHI ENERGIYA MANBALARIDA ISHLOVCHI ELEKTR STANSIYA JIHOZLARINING OPTIMAL TARKIBINI TANLASH

Gayibov Tulkin Shernazarovich¹- texnika fanlari doktori, professor,
Toshev Tajiddin Ungboyevich² – katta o‘qituvchi,

¹Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent sh., O‘zbekiston
²Qarshi muhandislik-iqtisodiyot instituti, Qarshi sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. Hozirgi inson faoliyatining barcha sohalarida elektr iste'molining yuqori suratlarda oshib borishi, uglevodod yuqilg'isi zahirasing cheklanganligi, shuningdek,

energetikaning ekologik muammolarini dolzarbliigi sharoiti qayta tiklanuvchan energiya resurslari, birinchi navbatda, quyosh va shamol energiyasida ishlovchi elektr stansiyalarini qurish va ishlatishni yanada samarali usullarini ishlab chiqish va joriy etishni talab etadi. Bunday turdagi energiya resurslari asosida ishlovchi elektr stansiyalariga ega bo'lgan avtonom gibridd tizimlarni loyihalashtirish, jumladan, asosiy jihozlarning optimal tarkibini tanlashni ko'zda tutadi. Hozirgi davrda ushbu masalani yechishning bir qator usullari mavjud bo'lishiga qaramasdan, ularni barcha cheklovchi va ta'sir etuvchi faktorlarni e'tiborga olish, optimallashtirishning aniqligini oshirish orqali takomillashtirish dolzarb masala hisoblanadi. Ushbu ishda tarkibida quyosh va shamol stansiyalari hamda akkumulyator batareyalari mavjud bo'lgan avtonom gibridd tizimlarda jihozlarning optimal tarkibini barcha omillarni e'tiborga olib tanlash masalasining samarali matematik modeli va uni yechish algoritmi taklif etilgan. Taklif etilgan model va optimallashtirish algoritmining samaradorligini tadqiqi natijalari keltirilgan. Amalga oshirilgan hisoblash tajribalarining natijalari asosida avtonom gibridd tizimda jihozlarning optimal tarkibini tanlashning taklif etilgan model va algoritmi yaxshi hisoblash sifatleri va yuqori hisoblash aniqligiga ega ekanligi aniqlangan.

Kalit so'zlar: *optimallashtirish, matematik model, algoritim, avtonom tizim, gibridd tizim, fotoelektr stansiyasi, shamol elektr stansiyasi, quyosh moduli, shamol agregati, kapital xarajat, ishlatish xarajatlari.*

UDC: 621.311.1

DEVELOPMENT OF METHODS FOR SELECTING THE OPTIMAL COMPOSITION OF EQUIPMENT IN POWER PLANTS OPERATING WITH RENEWABLE ENERGY RESOURCES

Gayibov, Tulkin Shernazarovich¹ – Doctor of Technical Sciences, Professor
Toshev, Tajiddin Ungboevich² – Senior Lecturer

¹Taskent State Technical University, Tashkent city, Uzbekistan

²Karshi Engineering-Economics institute, Karshi city, Uzbekistan

Abstract. *In modern conditions of intensive increasing the electricity consumption in all spheres of human activity, limited hydrocarbon fuel reserves, as well as the severity of environmental problems in the energy sector require the development and implementation of more effective methods for the construction and operation of power plants in basis of renewable energy resources, primarily solar and wind energy. The design of autonomous hybrid systems with stations using such energy resources involves, in particular, the selection of the optimal composition of the main equipment. Despite the current existence of a number of developments to solve this problem, the issues of improving them by taking into account all limiting and influencing factors, increasing the accuracy of optimization, remains an urgent task. This paper proposes an effective mathematical model and algorithm for selecting the optimal composition of units in autonomous hybrid systems containing solar and wind stations, as well as batteries, taking into account all factors. The proposed algorithm involves solving the problem by reducing it to a linear programming problem and using the simplex method. The results of a study of the effectiveness of the proposed model and optimization algorithm are presented. Based on the results of the calculation experiments performed, it was revealed that the proposed model and algorithm for optimizing the composition of equipment in an autonomous hybrid system has good computational quality and high calculation accuracy.*

Keywords: *optimization, mathematical model, algorithm, autonomous system, hybrid system, photovoltaic station, wind power station, solar module, wind unit, capital investment, operating costs.*

Введение

В современных условиях интенсивного повышения нагрузок электропотребления во всех сферах человеческой деятельности, ограниченности запаса традиционных углеводородных энергоресурсов, а также остроты проблемы охраны окружающей среды, особо важным является увеличение доли возобновляемых источников энергии в общем энергетическом балансе. Комплексное решение этой задачи требует, в частности, определения эффективных методов производства электроэнергии на основе использования возобновляемых энергоресурсов. Эффективность при этом, в первую очередь, определяется рациональным проектированием электростанций, использующих такие виды энергоресурсов, посредством оптимизации состава оборудования.

В данной работе рассматривается задача выбора состава оборудования в автономной гибридной энергосистеме, содержащей солнечной и ветровой станций (СФЭС и ВЭС), а также аккумуляторной батареей.

В существующей литературе приведены ряд разработок, в частности [1-7], посвященные к решению данной проблемы. Такие разработки, несомненно, внесли большой вклад в развитии теории и методов выбора оптимальной конфигурации оборудования в электростанциях, работающих на возобновляемых энергоресурсах.

В [1] даны результаты исследования вопроса выбора оптимальной конфигурации оборудования гибридной системы на основе ветровой и водородной установок. Однако, полученные в ней результаты нельзя непосредственно использовать для решения рассматриваемой в данной работе задачи. Работа [2] посвящена проблеме выбора оптимальной конфигурации оборудования на гибридной системе, состоящей из солнечной и ветровой установок, а также аккумуляторной батареи. Даны результаты решения задачи двумя методами искусственного интеллекта – алгоритмом роя частиц и генетическим алгоритмом и, как более эффективный для решения рассматриваемой задачи рекомендован второй алгоритм. Оптимизируемыми параметрами, в соответствии с использованным в этой работе математической модели, являются мощности установок. Поэтому, непосредственное применение описанной в ней модели и алгоритма для выбора состава оборудования в станциях, использующих возобновляемые энергоресурсы, связано с решением дополнительных задач. В [3] исследованы вопросы выбора оптимальной конфигурации гибридных электростанций, работающих на основе возобновляемых энергоресурсов. В работе Lanre Olatomiwa [4] приводятся результаты оценки состава оборудования в автономной гибридной системе, имеющей ветровой, солнечной и дизельной установок, которые служат для энергообеспечения трех учреждений здравоохранения в сельских районах Нигерии. Результаты аналогичных работ по оптимизации конфигурации гибридной системы, включающей солнечной, ветровой и дизельной станций в районе Саудовской Аравии, даны в [5]. В этих работах не представлены используемые математические модели и методы решения задачи. Важные научные результаты, посвященные эффективному решению рассматриваемой задачи приведены в работе Freire-Gormaly, M, & Bilton, A.M. [6]. В ней приводится математическая модель и алгоритм решения задачи оптимизации конфигурации автономной гибридной системы, содержащей солнечной и ветровой установок с аккумуляторной батареей. Согласно описанному алгоритму задача решается в двух этапах. На первом этапе на основе минимизации целевой функции, представляющую собой функцию вероятности нарушения электроснабжения, определяются различные варианты конфигурации оборудования системы. А на втором этапе минимизацией функции затрат с учетом ограничений по надежности электроснабжения определяют наиболее оптимальный вариант конфигурации. Несмотря на то, что описанный в этой работе метод является более эффективным по сравнению с другими рассмотренными методами для решения рассматриваемой здесь задачи, важным остается усовершенствование описанного метода в направлении повышения точности посредством совместного решения задач рассматриваемых

отдельно в двух этапах. В работе Farzad Ghayoor, Andrew G. Swanson, Hudson Sibanda [7] предложены математическая модель и алгоритм выбора оптимальных размеров систем, имеющих в своем составе солнечной и ветровой установок, параллельно работающих с электроэнергетической системой (ЭЭС). Однако, описанную модель и алгоритм расчета на её основе нельзя использовать для выбора оптимального состава оборудования в автономных гибридных системах.

В связи с этим проблема разработки и внедрения эффективных моделей и алгоритмов оптимизации состава оборудования электростанций работающих на возобновляемых энергоресурсах с учетом всех ограничивающих и влияющих факторов остается актуальной задачей.

В данной работе предлагается новая эффективная математическая модель и алгоритм решения задачи оптимизации состава оборудования в автономной гибридной энергосистеме, содержащей СФЭС, ВЭС и аккумуляторных батарей (АБ), которые являются развитием выполненных работ в этом направлении авторами данного материала [14-16].

Математическая модель и алгоритм оптимизации

Принципиальную схему рассматриваемой автономной гибридной системы можно представить в виде, показанном на рис. 1.

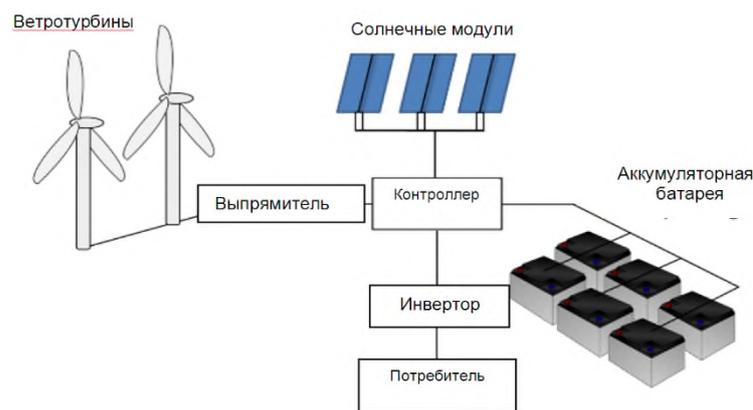


Рис.1. Принципиальная схема автономной гибридной системы, содержащей СФЭС, ВЭС и АБ.

Математическую модель задачи оптимизации состава оборудования автономной гибридной системы, имеющей в своем составе СФЭС, ВЭС и АБ, можно сформулировать в следующем виде:

- минимизировать целевую функцию, представляющую собой общие затраты, связанные с сооружением и эксплуатацией системы в течении расчетного периода T

$$Z = Z_{PV} + Z_W + Z_{BS} + Z_{BOS} = (1 + k_{PV.OM}) \cdot C_{PV} \cdot N_{PV} + (1 + k_{W.OM}) \cdot C_W \cdot N_W + (C_{BS} + C_{BS.rep}) \cdot N_{BS} + Z_{BOS} \rightarrow \min \quad (1)$$

с учетом ограничений:

- по балансу мощности в каждом временном интервале рассматриваемого периода T

$$P_{PV}^{(t)} + P_W^{(t)} + P_{BS}^{dch(t)} = P_L^{(t)} + P_{BS}^{ch(t)}, \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad (2)$$

- по допустимой минимальной и максимальной мощностям солнечных модулей и ветровых агрегатов

$$P_{PV}^{\min} \leq P_{PV}^{(t)} \leq P_{PV}^{\max}, \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad (3)$$

$$P_W^{\min} \leq P_W^{(t)} \leq P_W^{\max}, \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad (3a)$$

- по допустимой минимальной и максимальной зарядной мощностям аккумуляторной батареи

$$0 \leq P_{BS}^{ch(t)} \leq P_{BS}^{ch,max}, \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad (4)$$

$$0 \leq P_{BS}^{dch(t)} \leq P_{BS}^{dch,max}, \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad (4a)$$

- по допустимой минимальной и максимальной энергиям (ёмкости) заряда аккумуляторной батареи

$$W_{BS}^{(t)min} \leq W_{BS}^{(t)} \leq W_{BS}^{(t)max}, \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad (5)$$

где T -число временных интервалов в течении рассматриваемого периода; Z_{PV} , Z_W , Z_{BS} , Z_{BOS} - суммы капиталовложений и эксплуатационных расходов на солнечные модули, ветровых агрегатов, аккумуляторные батареи и другие установки преобразования, управления и регистрации, соответственно; C_{PV} , C_W , C_{BS} - удельные капиталовложения для солнечных модулей, ветровых агрегатов и аккумуляторных батарей; $C_{BS.rep.}$ - удельные капиталовложения, связанные с заменой аккумуляторной батареи; $k_{PV.OM}$, $k_{W.OM}$ - удельные эксплуатационные затраты для солнечной модули и ветрового агрегата, соответственно; N_{PV} , N_W , N_{BS} - числа солнечных модулей, ветровых агрегатов и аккумуляторных батарей; $P_{PV}^{(t)}$, $P_W^{(t)}$, $P_{BS}^{ch(t)}$, $P_{BS}^{dch(t)}$ - суммарная мощность солнечных модулей, ветровых агрегатов и мощности заряда и разряда аккумуляторных батарей в t - м временном интервале рассматриваемого периода, соответственно; $P_{BS}^{ch,max}$, $P_{BS}^{dch,max}$ - допустимые максимальные мощности заряда и разряда аккумуляторной батареи; $W_{BS}^{(t)}$, $W_{BS}^{(t)min}$, $W_{BS}^{(t)max}$ - количество энергии в аккумуляторной батареи в t - м временном интервале, а также её допустимые минимальное и максимальное значения; $W_{BS.отд.}^{(t)}$, $W_{BS.пол.}^{(t)}$ - количество отданной за счет разряжения и полученной за счет заряжения аккумуляторной батарией электроэнергии к t – му временному интервалу.

В результате решения рассматриваемой задачи определяются, в частности, оптимальное число солнечных модулей N_{PV} , ветровых агрегатов N_W и аккумуляторов в батареи N_{BS} . Поэтому, при решении задачи по приведенной математической модели параметры в ограничивающих условиях выразим через эти неизвестные. Мощности солнечных модулей и ветровых агрегатов в t - м временном интервале можно определит как в работе [6] :

$$P_{PV}^{(t)} = R_{sol}^{(t)} \cdot A \cdot N_{PV} \cdot \eta_{PV}^{(t)} \cdot \eta_{El}, \quad (6)$$

$$P_W^{(t)} = (av^{(t)3} + bv^{(t)2} + cv^{(t)} + d) \cdot \eta_W^{(t)} \cdot \eta_{El} \cdot N_W, \quad (6a)$$

где $R_{sol}^{(t)}$ - удельная мощность падающей солнечной радиации; A - площадь поверхности одной солнечной панели; $\eta_{PV}^{(t)}$, $\eta_W^{(t)}$ - КПД солнечной модули и ветрового агрегата в t - м временном интервале; η_{El} - КПД системы электроники, которая служит для обеспечения надежной работы СФЭС и ВЭС, по [8] $\eta_{El}=0,98$; $v^{(t)}$ - скорость ветра в t - м временном интервале; a , b , c , d - постоянные коэффициенты кубического полинома, получаемого в результате аппроксимации зависимости $P_W(v)$, задаваемого производителем, в табличном виде.

Количество энергии в аккумуляторной батареи к t - му временному интервалу $W_{BS}^{(t)}$ можно определит следующим образом:

$$W_{BS}^{(t)} = W_b + \sum_{i=1}^t P_{BS}^{ch(i)} - \sum_{i=1}^t \frac{P_{BS}^{dch(i)}}{\eta_{BS}}, \quad (7)$$

где W_b - остаточная энергия в аккумуляторной батареи в начале рассматриваемого периода, когда $t=0$; $\eta_{BS}^{(i)}$ - КПД аккумуляторной батареи в i - м временном интервале.

С учетом выражений (6) и (6a) ограничений (3) и (3a) можно представит в следующем виде:

$$P_{1PV}^{min} \cdot N_{PV} \leq R_{sol}^{(t)} \cdot A \cdot N_{PV} \cdot \eta_{PV}^{(t)} \cdot \eta_{El} \leq P_{1PV}^{max} \cdot N_{PV}, \quad (3b)$$

$$P_{1W}^{\min} \cdot N_W \leq (av^{(t)3} + bv^{(t)2} + cv^{(t)} + d) \cdot N_W \leq P_{1W}^{\max} \cdot N_W, \quad (3c)$$

где P_{1PV}^{\min} , P_{1PV}^{\max} , P_{1W}^{\min} , P_{1W}^{\max} - минимальная и максимальная допустимые мощности одной солнечной модули и одного ветрового агрегата.

Разделив неравенства (3b) и (3c) на N_{PV} и N_W , соответственно, получим условия, которые не зависят от числа солнечных модулей и ветровых агрегатов. Это показывает, что ограничение (3) и (3a) не влияют на результат решения рассматриваемой задачи. Поэтому в математической модели задачи исключаем эти ограничения.

Ограничения по допустимым минимальным и максимальным зарядным и разрядным мощностям аккумуляторных батарей (4) и (4a) можно представит в следующем виде:

$$0 \leq P_{BS}^{ch(t)} \leq P_{1BS}^{ch,max} \cdot N_{BS}, \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad (8)$$

$$0 \leq P_{BS}^{dch(t)} \leq P_{1BS}^{dch,max} \cdot N_{BS}, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (9)$$

где $P_{1BS}^{ch,max}$, $P_{1BS}^{dch,max}$ - допустимые максимальные зарядная и разрядная мощности одной аккумуляторной батареи.

По аналогии с полученными выше, ограничение (5) можно описать следующим образом:

$$W_{1BS}^{\min} \cdot N_{BS} \leq W_b + \sum_{i=1}^t P_{BS}^{ch(i)} - \sum_{i=1}^t \frac{P_{BS}^{dch(i)}}{\eta_{BS}^{(i)}} \leq W_{1BS}^{\max} \cdot N_{BS}, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (10)$$

где W_{1BS}^{\min} , W_{1BS}^{\max} - минимальный и максимальный допустимые значения электроэнергии, которые могут быть накоплены в одном аккумуляторе.

В рассматриваемом случае принимаем, что в конце рассматриваемого периода (когда $t=T$) остаточная электроэнергия в аккумуляторной батарее будет такой же, как в начале периода W_b . В таком случае, для обеспечения выполнения этого условия в число учитываемых ограничений добавляется следующая условия в виде равенства:

$$\sum_{i=1}^T P_{BS}^{ch(i)} - \sum_{i=1}^T \frac{P_{BS}^{dch(i)}}{\eta_{BS}^{(i)}} = 0, \quad (11)$$

где $\sum_{i=1}^T P_{BS}^{ch(i)} = W_{BS,пол.}^{(T)}$ - количество электроэнергии полученная аккумуляторной батареей за

период T за счет зарядения; $\sum_{i=1}^T \frac{P_{BS}^{dch(i)}}{\eta_{BS}^{(i)}} = W_{BS,отд.}^{(T)}$ - количество электроэнергии отданная аккумуляторной батареей за период T за счет разряжения.

В настоящее время нормативный срок службы многих солнечных модулей, ветровых агрегатов и остальных установок преобразования, управления, регистрации и соединения составляет 25 лет [6, 9]. Вместе с тем, нормативный срок службы гелиевых аккумуляторов можно 10 лет. Приведенные к текущим ценам затраты, связанные с заменой аккумуляторной батареи можно определить по формуле

$$C_{BS,rep} = k_{pr,rep} \cdot C_{BS} = \frac{1}{(1 + k_{dis})^n} \cdot C_{BS}, \quad (12)$$

где $k_{pr,rep}$ - коэффициент приведения удельных капиталовложений в будущем к текущим ценам; k_{dis} - коэффициент дисконта, определяющий степень снижения удельных капиталовложений при замене, которой принимают 5,15%; n - порядковый номер года замены аккумулятора от начала его эксплуатации. Соответственно, при приведении удельных капиталовложений для аккумуляторной батареи к 25 лет следует учитывать его замены 2 раза, т.е. в 10-м и 20-м годах эксплуатации, и остаточную стоимость:

$$k_{pr,rep} = \frac{1}{1,0515^{10}} + 0,5 \cdot \left(\frac{1}{1,0515^{20}} + \frac{1}{1,0515^{30}} \right) = 0,9. \quad (13)$$

Таким образом, $C_{BS,rep} = 0,9 \cdot C_{BS}$.

Число аккумуляторов в одной ветви батареи определяется в соответствии с номинальными напряжениями сети U_{net} и одного аккумулятора U_{1BS} :

$$N_{BS.ser.} = \frac{U_{net}}{U_{1BS}}. \quad (14)$$

Получаемое по последней формуле число округляют в большую сторону. Общее число аккумуляторов в батарее определяется перемножением число параллельно соединяемых ветвей с аккумуляторами $N_{BS.par.}$ и число последовательно соединяемых в одной ветви аккумуляторов $N_{BS.ser.}$:

$$N_{BS} = N_{BS.par.} \cdot N_{BS.ser.}. \quad (15)$$

Согласно [9, 10, 13] годовые эксплуатационные расходы для солнечных модулей можно принять 2,5% от капиталовложения. Кроме того, при определении этих расходов следует учитывать коэффициент приведения будущих расходов к текущим ценам, определяемый как в работе [6, 11]:

$$k_{pr.PV} = \frac{(1 + k_{dis})^N - 1}{k_{dis} \cdot (1 + k_{dis})^N} = \frac{1,0515^{25} - 1}{0,0515 \cdot 1,0515^{25}} = 13,88. \quad (16)$$

Таким образом, $k_{PV.OM} = 0,025 \cdot 13,88 = 0,347$.

Эксплуатационные расходы для ветровых агрегатов составляют 0,019-0,027 \$/кВт.ч. В упрощенных расчетах годовые эксплуатационные расходы можно принимать 2% от капиталовложения [9], а коэффициент дисконта 0,0515. В таком случае, коэффициент приведения будущих эксплуатационных затрат к текущим ценам получается таким же, что и для солнечных модулей (16) и соответственно $k_{W.OM} = 0,278$.

Капиталовложение и эксплуатационные расходы для остальных установок Z_{BOS} зависит от их значений для солнечных модулей и ветровых агрегатов. Их можно принять как в [6].

Таким образом, рассматриваемая задача математически формулируется в следующем виде:

Целевая функция

$$Z = 1,847 \cdot C_{PV} \cdot N_{PV} + 1,778 \cdot C_W \cdot N_W + 1,9 \cdot C_{BS} \cdot N_{BS.ser.} \cdot N_{BS.par.} \rightarrow \min; \quad (17)$$

ограничения

$$R_{sol}^{(t)} \cdot A \cdot N_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot \eta_{El} + (av^{(t)3} + bv^{(t)2} + cv^{(t)} + d) \cdot \eta_W^{(t)} \cdot \eta_{El} \cdot N_W -; \quad (18)$$

$$- P_{BS}^{ch(t)} + P_{BS}^{dch(t)} = P_L^{(t)}, \quad t = 1, 2, \dots, T$$

$$0 \leq P_{BS}^{ch(t)} \leq P_{1BS}^{ch.max} \cdot N_{BS.ser.} \cdot N_{BS.par.}, \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad (19)$$

$$0 \leq P_{BS}^{dch(t)} \leq P_{1BS}^{dch.max} \cdot N_{BS.ser.} \cdot N_{BS.par.}, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (19a)$$

$$W_{1BS}^{min} \cdot N_{BS.ser.} \cdot N_{BS.par.} \leq W_b + \sum_{i=1}^t P_{BS}^{ch(i)} - \sum_{i=1}^t \frac{P_{BS}^{dch(i)}}{\eta_{BS}^{(i)}} \leq \quad (20)$$

$$\leq W_{1BS}^{max} \cdot N_{BS.ser.} \cdot N_{BS.par.}, \quad t = 1, 2, \dots, T,$$

$$\sum_{i=1}^T P_{BS}^{ch(i)} - \sum_{i=1}^T \frac{P_{BS}^{dch(i)}}{\eta_{BS}^{(i)}} = 0, \quad (21)$$

При известных графиках падающей солнечной радиации $R_{sol}^{(t)}$ и скорости ветра $v^{(t)}$ полученная задача (17)-(21) приводится к задаче линейного математического программирования. Поэтому для её решения можно использовать симплексный метод. Блок-схема алгоритма решения задачи на основе симплексного метода приведена на рис. 2.

На основе решения задачи находятся оптимальные значения всех $3+2T$ параметров N_{PV} , N_W , $N_{BS.par.}$ и $P_{BS}^{ch(1)}$, $P_{BS}^{ch(2)}$, ..., $P_{BS}^{ch(T)}$, $P_{BS}^{dch(1)}$, $P_{BS}^{dch(2)}$, ..., $P_{BS}^{dch(T)}$. Число солнечных модулей, ветровых агрегатов и параллельных ветвей с конденсаторами определяют округлением

соответствующих N_{PV} , N_W , $N_{BS,par}$ до ближайших целых чисел. Затем, по формуле (15) определяют общее число аккумуляторов в батарее.

Результаты

Эффективность предложенной математической модели и алгоритма исследованы на примере выбора состава солнечных модулей, ветровых агрегатов и аккумуляторных батарей в автономной гибридной системе, обеспечивающей электрического потребителя, работающей с заданным средним суточным графиком нагрузок.

Суточный период представлен восьми характерными временными интервалами. Графики нагрузок потребителя, удельная мощность падающей солнечной радиации, скорость ветра и соответствующие мощности ветрового агрегата, определённые по данным производителя (табл. 2), приведены в таблице 1.

Таблица 1

Графики нагрузок потребителя и удельной мощности падающей солнечной радиации

t , ч.	1	2	3	4	5	6	7	8
P_L , кВт	7,6	12,0	25,6	30,4	23,2	31,2	36,0	13,0
$R_{sol}^{(t)}$, кВт/м ²	0,0	0,0	0,35	0,65	0,75	0,45	0,1	0,0
$v^{(t)}$, м/с	5,5	4,6	4,5	2,4	3,9	4,2	5,3	6,2
$P_W^{(t)}$, кВт	0,125	0,084	0,080	0,000	0,056	0,068	0,115	0,170

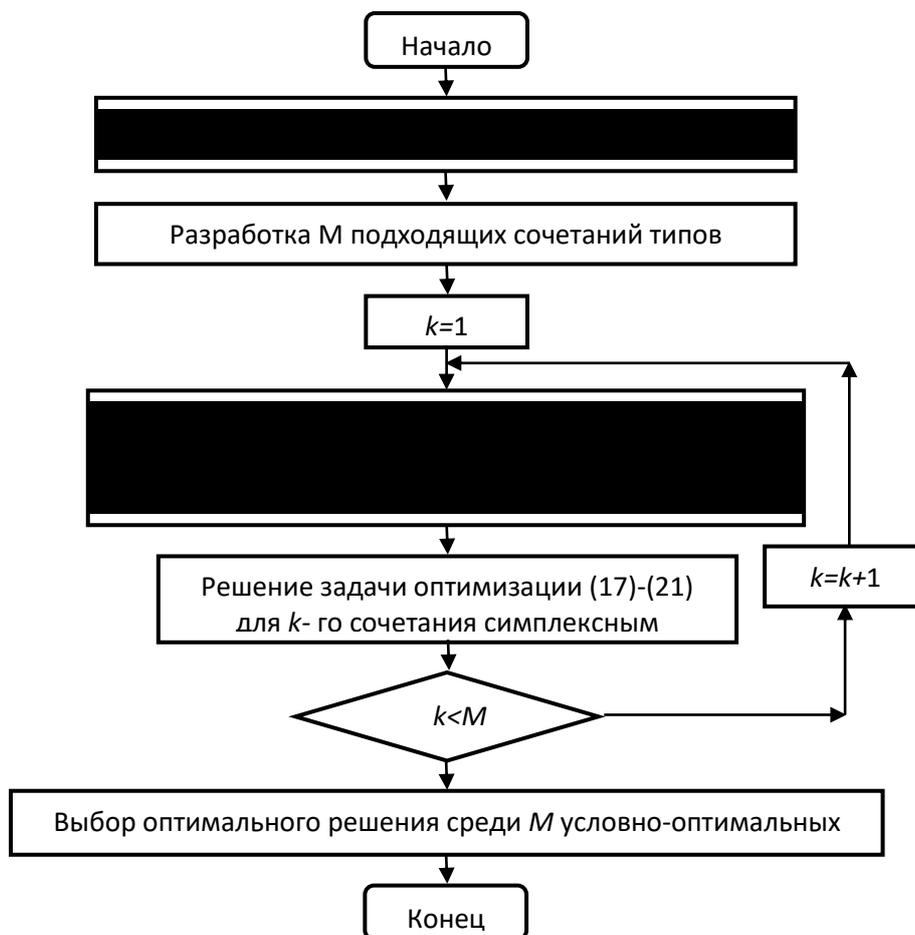


Рис. 2. Укрупненная блок-схема алгоритма оптимизации состава оборудования станций.

В качестве примера выбраны по одному типу солнечного модуля, ветрового агрегата и аккумуляторной батареи.

Параметры выбранного типа солнечного модуля:

Место производства: Anhui, China; Номер модели: SUN410-430 DE21M; Тип: PERC, Shingled Solar Panel, монокристаллический кремний; срок службы: 25 лет; максимальная мощность: $P_{IPV}=415$ Вт; размер поверхности панели: 1723x1134 мм; эффективность: 20%; удельная стоимость: $C_{IPV}=0,19$ \$/Вт.

Параметры типа ветрового агрегата:

Модель: SWG EW-1000; номинальная мощность: 1 кВт; скорость начала генерации энергии: 3,5 м/с; расчетная рабочая скорость: 12 м/с; частота вращения: 450 об/мин, по часовой стрелке; удельная стоимость: 1000 \$/шт; кривая мощности (зависимость выдаваемой мощности от скорости ветра) задана в таблице 2.

Таблица 2

Кривая мощности для ветрового агрегата типа EW-1000

$v, \text{ м/с}$	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0
$P_w, \text{ кВт}$	0,04	0,06	0,10	0,15	0,25	0,35	0,47	0,62	0,85	1,10

Параметры аккумуляторной батареи:

Место производства: Guangdong, China; Номер модели: GE100AH/ 12V(100); тип: Gel Lead Battery; срок службы: 10 лет; Размер аккумулятора: 12V, 100AH; максимальный ток зарядки: $I_1^{ch.max} = 10$ А; стоимость одного аккумулятора: 91 \$/шт.

В расчетах КПД аккумуляторной батареи во всех временных интервалах приняты $\eta_{BS}^{(i)} = 0,85$.

Для формирования задачи оптимизации определены соответствующие параметры её математической модели (17)-(21). Номинальное напряжение электрической сети 220 В. В соответствии с этим и по (14) имеем $N_{BS.ser} = 20$ шт. Соответственно, в рассматриваемом примере

$$\text{и } P_{BS}^{ch.max} = P_{1.BS}^{ch.max} \cdot N_{BS.ser} \cdot N_{BS.par} = 12 \text{ В} \cdot I_1^{ch.max} \cdot 20 \text{ шт} \cdot N_{BS.par} = 2,4N_{BS.par}.$$

Максимальный ток разряда для гелиевых аккумуляторов примерно 10 раз больше чем максимальный ток заряда. С учетом этого, принимаем $I_1^{dch.max} = 100$ А и аналогичным образом получаем выражение для максимальной мощности разряда: $P_{BS}^{dch.max} = 24N_{BS.par}$.

На основе аналогичных расчетов получаем выражение для максимальной энергии заряда аккумуляторной батареи $W_{BS}^{max} = 24N_{BS.par}$. А выражение для минимальной допустимой энергии заряда находим исходя из условия допустимой глубины разряда аккумуляторной батареи 20%: $W_{BS}^{min} = 4,8N_{BS.par}$. Минимальные и максимальные допустимые энергии заряда аккумуляторной батареи во всех временных интервалах приняты одинаковыми.

Стоимость одного солнечного модуля: $C_{PV} = C_{IPV} \cdot P_{IPV} = 415 \cdot 0,19 = 78,85$ \$.

Оптимальное число солнечных модулей, полученное в результате решения задачи на основе использования предложенной математической модели и алгоритма расчета: $N_{PV} = 176$ шт. Оптимальное число ветровых агрегатов: 45 шт. Оптимальное число параллельно соединенных ветвей с 20 аккумуляторами в каждом: $N_{BS.par} = 13$ шт. Соответственно, общее число аккумуляторов в батарее по (15): $N_{BS} = 20 \cdot 13 = 260$ шт. Минимальное значение целевой функции: $Z_{min} = 148874,01$ \$.

В таблице 3 приведены полученные в результате решения задачи, оптимальные графики нагрузок СФЭС, ВЭС и зарядки и разрядки аккумуляторной батареи по временным интервалам суток.

Таблица 3

Оптимальные мощности зарядки и разрядки аккумуляторной батареи

$t, \text{ч.}$	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_L, \text{кВт}$	7,6	12,0	25,6	30,4	23,2	31,2	36,0	13,0
$P_{PV}^{(t)}, \text{кВт}$	0,00	0,00	23,62	43,87	50,62	30,37	6,75	0,00
$P_W^{(t)}, \text{кВт}$	5,52	3,71	3,53	0,00	2,47	3,00	5,08	7,51
$P_{BS}^{ch(t)}, \text{кВт}$	0,00	0,00	1,55	13,47	29,90	2,17	0,00	0,00
$P_{BS}^{dch(t)}, \text{кВт}$	2,08	8,29	0,00	0,00	0,00	0,00	24,17	5,49

Достоверность полученного результата оптимизации проверена путем его сопоставления его с множеством случайно выбранных допустимых решений. При всех случайно выбранных решениях значения целевой функции получались больше чем при оптимизации использованием предложенной модели и алгоритма расчета.

Заключения

1) Предложена математическая модель задачи оптимизации состава оборудования в автономной гибридной системе, содержащей солнечную фотоэлектрическую станцию, ветровую станцию и аккумуляторную батарею, с учетом ограничивающих условий и потерь в элементах.

2) Предложен алгоритм решения задачи оптимизации состава оборудования в автономной гибридной системе, основанный на приведении её к задаче линейного программирования и использованию симплексного метода.

3) На основе выполненных расчетных экспериментов на конкретном примере установлено, что предложенная модель и алгоритма оптимизации состава оборудования в автономной гибридной системе обладает хорошим вычислительным качеством и точностью расчета.

Литература

- [1] Wang, Zekun & Jia, Yan & Yang, Yingjian & Cai, Chang & Chen, Yinpeng. (2021). Optimal Configuration of an Off-Grid Hybrid Wind-Hydrogen Energy System: Comparison of Two Systems. *Energy Engineering.*, 1641-1658.
- [2] SUN Qiana, MA Jianweia, SHE Yanjieb, ZHANG Jingchaoc, GU Bod, ZHANG Zichaoe. (2019). Optimal Configuration of Standalone Wind–Solar–Storage Complementary Generation. *Journal of Power Technologies* 99 (4) , 231-236.
- [3] Zhang, Junli & Wei, Huashuai. (2022, August 24). A review on configuration optimization of hybrid energy system based on renewable energy. *Frontiers in Energy Research*, pp. 01-15.
- [4] Lanre Olatomiwa. (2016). Optimal configuration assessments of hybrid renewable power supply for rural healthcare facilities. *Energy Reports*, 141-146.
- [5] Mas'ud, A.A.; Al-Garni, H.Z. (2021). Optimum Configuration of a Renewable Energy System Using Multi-Year Parameters and Advanced Battery Storage Modules: A Case Study in Northern Saudi Arabia. *Sustainability*, 13, 5123.
- [6] Freire-Gormaly, M, & Bilton, A.M. (2015, August 2-5). Optimization of Renewable Energy Power Systems for Remote Communities. *Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2015 Boston, Massachusetts, USA*, p. 11.
- [7] Farzad Ghayoor, Andrew G. Swanson, Hudson Sibanda. (2021). Optimal sizing for a grid-connected hybrid renewable energy system: A case study of the residential sector in Durban, South Africa. *Journal of Energy in Southern Africa* 32(4):, 11-27.

- [8] Tristar. (2014). TriStar MPPT Maximum Power Point Tracker.
- [9] TRISTAR MPPT 600V. (2022). Solar Battery Charger with TrakStar™ Maximum Power Point Tracking Technology.
- [10] TriStar MPPT 600V TM with Off-grid / Grid-tie Transfer Switch. (2017). “Solar Battery Charger with TrakStar™ Maximum Power Point Tracking Technology.
- [11] Christoph Kost, Shivenes Shammugam, Verena Fluri, Dominik Peper, Aschkhan Davoodi Memar, Thomas Schelegl. (2021). Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies. Germaniya.
- [12] Christoph Kost, Shivenes Shammugam, Verena Julch, Huyen-Tran Nguyen, Thomas Schelegl. (2018). Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies. Germaniya.
- [13] J. White, K. Case, and D. Pratt. (2010). Principles of Engineering Economic Analysis. Hoboken, NJ: Wiley Higher Education.
- [14] Lagerveld S., Röckmann C., & Scholl M. (2014). A study on the combination of offshore wind energy with offshore aquaculture. IMARES Report C056/14. Retrieved August 2, 2016, from <http://edepot.wur.nl/318329>.
- [15] Felipe Sabadini, Reinhard Madlener. (2021). The economic potential of grid defection of energy prosumer households in Germany. *Advances in Applied Energy*.
- [16] Гайибов Т. (2020). Выбор оптимальных параметров солнечных фотоэлектрических станций и аккумуляторов в распределительных электрических сетях. Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы (pp. 237-242). 2020: НИИ Физика полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистан.
- [17] Gayibov T.Sh., Fayziyev M.M., Toshev T.U. (2022). Tarkibida qayta tiklanuvchan energiya manbalarida ishlovchi elektr stansiyalari mavjud boʻlgan elektr energetika tizimlarining rejimlarini optimallashtirish. *Инновацион технологиялар*, 26-29.
- [18] T.Sh. Gayibov, T.U. Toshev. (2023). Avtonom quyosh fotoelektr tizimlarining tarkibini optimallashtirish. *Energiya va resurs tejash muammolari*, 292-298 b.
- [19] Gayibov T.Sh., Toshev T.U. (2023). Quyosh Fotoelektr stansiyalari elementlarning optimal tarkibini tanlash masalasining matematik model va uni yechish algortimi. *Инновацион технологиялар*, 13-21.
- [20] Toshev T.U., Tuxtayev B.B. (2023). Quyosh Fotoelektr tizimlarini elektr taʼminoti tarmogʻiga ulanish holati. *Kelajak samarali energetikasi: muammolar va echimlar* (pp. 351-354). Fargʻona: Fargʻona politexnika instituti.