

RUSSIAN ARCTIC

russian-arctic.info

#1(8)/2020



ELECTRIC-POWER ENGINEERING FOR THE ARCTIC

welcome letter

by Mr.Rhee Han Woo,
editorial board memeber,
Dankook University,,
Korea

original study

PROBLEMS OF ENERGY SUPPLY IN THE
ARCTIC REGIONS
K.A. Zmieva

RUSSIAN ARCTIC № 1(8) 2020 SCIENTIFIC PEER-REVIEWED JOURNAL

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР: К.А. Эмиева, к.т.н.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Nikolay Koldunov, PhD (Bremen, Germany)
Hajime YAMAGUCHI, professor (Tokyo, Japan)
YOUNKYOO KIM, professor (Seoul, Korea)
Mr. Rhee Han Woo, candidate of Doctor of IR (Seoul, Korea)
Kokin Sergey, PhD (Harbin, China)
Chashchin Valery, Doctor of Sciences, Prof (St. Petersburg, Russia)
Dmitriev Vasily, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Filippov Boris, Doctor of Sciences (Arkhangelsk, Russia)
Gavrilov Vladimir, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Gorbanev Sergey, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Hrennikov A., Doctor of Technical Sciences (Moscow, Russia)
Kapitanov Aleksey, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Kydrushova Elena, Doctor of Sciences, Prof (Arkhangelsk, Russia)
Levykin Sergey, Doctor of Sciences, Prof (Yekaterinburg, Russia)
Mironov Evgeny, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Mitina Elena, Doctor of Sciences (Murmansk, Russia)
Nikuschenko Dmitry, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Prohorchuk Egor, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)

Repina Irina, Doctor of Sciences, Professor (Moscow, Russia)
Serebryannikov S., Doctor of Technical Sciences (Moscow, Russia)
Semenov Vladimir, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Slobodchikov Vladimir, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Stepanova Vera, Doctor of Sciences (Arkhangelsk, Russia)
Schwarzburg Leonid, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Tokarevich Nikolay, Doctor of Sciences (St. Petersburg)
Turichin Gleb, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Zvorykina Julia, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Bayeva Julia, PhD (Moscow, Russia)
Ivanov Boris, PhD (St. Petersburg, Russia)
Karyakin Yuri, PhD (Moscow, Russia)
Klimanov Igor, PhD (Moscow, Russia)
Nikanov Alexander, PhD (St. Petersburg, Russia)
Saltykova Olga, PhD (Cheboksary, Russia)
Tretyakov Viktor, PhD (St. Petersburg, Russia)
Khvostova Marina, PhD (Moscow, Russia)
Pisarev Sergey, PhD (St. Petersburg, Russia)
Chebrov Danila, PhD (Petropavlovsk-Kamchatskiy, Russia)
Yulin Alexander, PhD (St. Petersburg, Russia)

EDITORIAL STAFF

Science editor: Alexeeva Tatiana (AARI)

CEO: Makova Elena

Executive secretary: Marina Drobyshevskaya

Art editor: Nikolay Kutuzov

Pr: Olga Chahovskaya

MANUSCRIPT SUBMISSION: info@arctic-centre.com

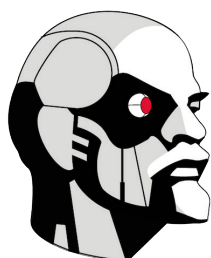
ADDRESS: 101000, Moscow, Armenian lane, 9/1/1 bld., room 203:

MASS MEDIA registration: ЭЛ №ФС77-72859

FOUNDER AND PUBLISHER: LLC Center for Information and Legal Support for the Development of the Arctic
<http://arctic-centre.com>

CEO: Yu.V. Belikova

ISSN (online): 2658-4255



CYBERLENINKA



The journal is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International.

www.creativecommons.org

ISSUE DATE: 10.04.2020



- 4 Welcome letter by Rhee Han Woo
- 5 PROBLEMS OF ENERGY SUPPLY IN THE ARCTIC REGIONS
K.A. Zmieva
- 15 INFLUENCE OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES IN THE POLAR REGIONS
ON THE REACTIVE POWER TRANSMISSION MODE ON THE AIRLINE
A. Kuvshinov, V. Vakhnina, A. Yu. Khrennikov, A.N. Chernenko
- 23 USE OF SHIP POWER FOR LIFE SUPPORT OF ARCTIC FACILITIES
R.N. Shulga, T. S. Smirnova
- 37 RESEARCH OF POWER CHARACTERISTICS OF POWER RECTIFIERS
TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES
OF THE NORTHERN REGIONS
K.A. Zmieva
- 52 FORMULATION OF COMPLEX OPTIMIZATION PROBLEM OF
CONSTRUCTING MICROGRIDS IN THE ARCTIC ENCLAVE
BASED ON MULTI-AGENT REPRESENTATION
G.P. Pavliuk, A.K. Abd Elraheem, V.A. Shikhin
- 65 USE OF AMORPHOUS ALLOY TAPE AS A HEATING ELEMENT
IN HEATING AND DE-ICING SYSTEMS FOR ARCTIC TERRITORIES
D.V. Makhnev, K.A. Zmieva



*Welcome letter by
Mr. Rhee Han Woo,
new Editorial board member
Dankook University,
Korea.*

*About international cooperation between
North Korea and Russia in the Arctic
and the role of business in integration
process.*

The ocean currents heated at the equator cool in the Arctic and form currents that return to the equator, which control the climate of all continents.

The Arctic, humanity's ice storage, is awaiting more expert research and more benign investors' sustainable investment.

A new route between Europe and Northeast Asia, which has long been blocked by glaciers, is being opened in the Arctic, and South Korea and Russia are becoming countries that enjoy the benefits themselves.

Natural gas, oil and gold buried in the Arctic will be developed in an environmentally friendly manner to contribute to the sustainable development of the countries involved.

It is a great personal honor to be part of this journal, which shares the deep research and academic achievements of experts from Agricultural and Biological Sciences, Physiology (Medical), Mechanical Engineering, Energy, Earth and Planetary Sciences to realize this close future.

I am working on bilateral multilateral international cooperation at my workplace, the Korea Energy Agency. The conclusion

I have gained from doing this is that partners of cooperation need a deep understanding of each other and that business must be based in order for that cooperative relationship to continue.

As an expert in international relations, I would like to study what the Arctic region means to South Korea and Russia, how effective it is for the two countries to cooperate, how global cooperation should be and what kind of business there should be to sustain that cooperation, and exchange views with other experts.

Wishing for the development of the Russian Arctic, and the grace of God to all the experts who work together.

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ

К.А. Змиева

Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образование «Московский государственный технологический Университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

✉ kirazmieva@mail.ru

В работе рассмотрены текущие проблемы энергоснабжения арктических регионов, проанализированы их основные причины. Представлен опыт стран ЕС, США и Японии по применению возобновляемых источников энергии. Показаны пути повышения эффективности энергоснабжения Арктики.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, альтернативная энергетика, Арктика, энергоснабжение, электроэнергия, ветровая энергетика, солнечная энергетика, атомная энергетика, биоэнергетика.

PROBLEMS OF ENERGY SUPPLY IN THE ARCTIC REGIONS

K.A. Zmieva

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

This paper examines the current problems of energy supply in the Arctic regions and analyzes their main causes. The experience of the EU, USA and Japan on the use of renewable energy sources is presented. Ways to improve the efficiency of energy supply in the Arctic are shown.

Keywords: renewable energy, alternative energy, Arctic, energy supply, electricity, wind energy, solar energy, nuclear energy, bioenergy.

Статья получена: 05.04.2020

Принята к публикации: 09.04.2020

Опубликована: 10.04.2020

Введение

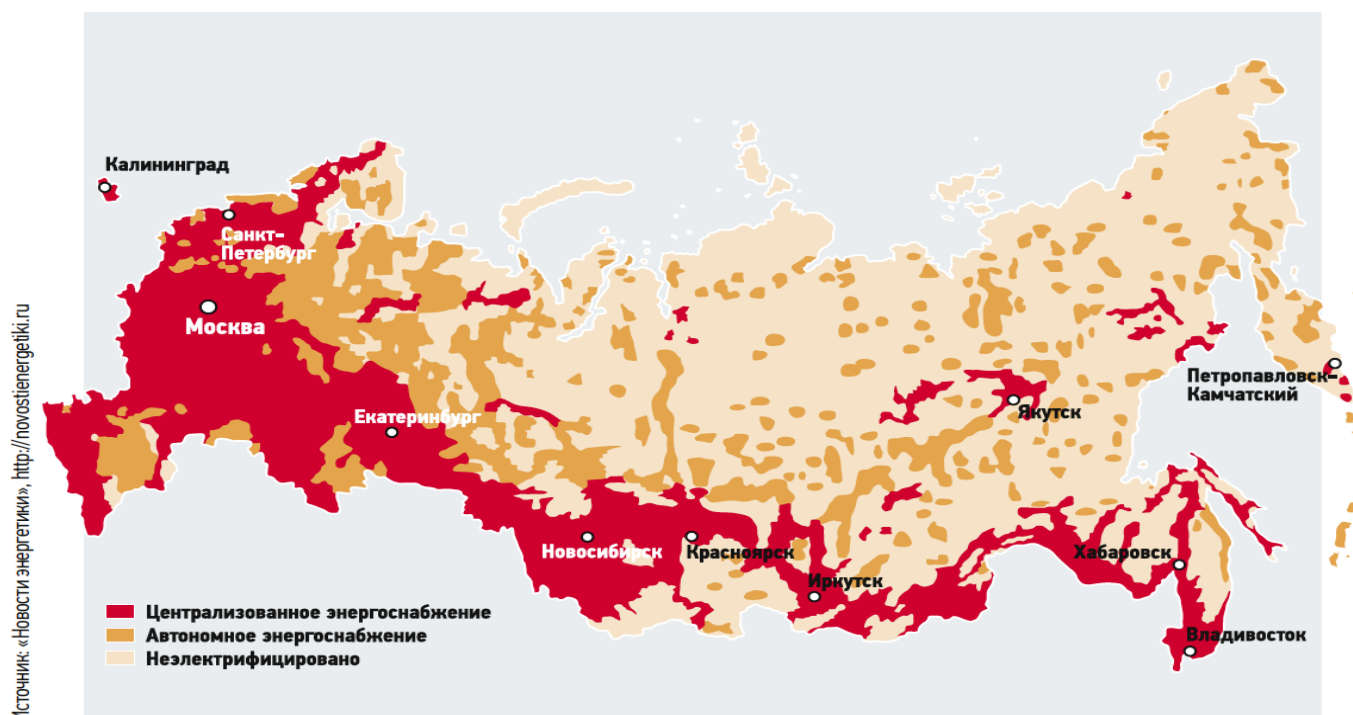
Сегодня Арктика характеризуется, с одной стороны, огромным объемом разведанных запасов углеводородов (основных источников электроэнергии в мире), а с другой – серьезными проблемами с электроснабжением региона. Самые северные районы России не включены в систему централизованного электроснабжения (по высоковольтным линиям электропередач) и традиционно снабжаются электроэнергией от устаревших дизельных электрогенераторов и небольших угольных станций (рис. 1).

Топливо поставляется в Арктику в рамках так называемого «северного завоза», и в связи с высокой удаленностью регионов севера, ограниченными летним периодом сроками доставки и устареванием существующих дизель-генераторов стоимость электроэнергии на них получается очень высокой [1]. Кроме того, в связи с частыми перебоями в поставках, местное население вынуждено обеспечивать запасы дизельного топлива в среднем на 1,5-2 года. Дизельные электростанции имеют низкий КПД и очень высокую себестоимость производства электроэнергии, которая доходит до 80-120 рублей за кВт/час.

Тарифы на электроэнергию в изолированных системах электроснабжения регионов Крайнего Севера сегодня составляют 22–237 руб./кВт·ч, что в 5–55 раз выше средних по России. При этом, для сравнения, если взять среднюю цену электроэнергии в зоне централизованного энергоснабжения по стране — это 3-4 рубля за кВт/ час для конечного потребителя [2].

Включение арктических и прочих отдаленных малонаселенных территорий страны в систему централизованного энергоснабжения еще несколько десятков лет назад было признано неэффективным и слишком дорогостоящим проектом. В то же время высокая себестоимость производства электроэнергии влечет за собой необходимость бюджетных субсидий для сдерживания тарифов для населения (покрытие разницы между тарифом для населения и необходимой валовой выручки). Общий объем государственных субсидий исчисляется сотнями миллиардов рублей, а совокупный объем затрат на энергоснабжение всех потребителей 15 регионов Крайнего Севера сегодня равен 1,7 трлн руб.

Дефицит электроэнергии и ее высокая стоимость сильнее всего образом



■ ■ Рис. 1. Централизованные и автономные системы электроснабжения на территории РФ

Рисунок 1 – Схема электроснабжения РФ¹

¹ Иллюстрации предоставлены кафедрой ВИЭГ СПбГПУ. По материалам Международного электроэнергетического форума UPGrid.

сдерживают темпы развития арктического региона и делают его менее комфортным и привлекательным для населения.

Оценка расходов на энергоснабжение в регионах Крайнего Севера РФ

По официальным данным, число децентрализованных систем энергоснабжения в регионах Крайнего Севера с высокими затратами на электроэнергию превышает несколько тысяч, которые обслуживают более 11 млн чел. Всего от локальных систем энергоснабжения сегодня питается более 30 тысяч поселений. Из них более 6 000 имеют население свыше 500 чел., более 1 000 поселений имеют население свыше 2 000 чел., и 580 поселений имеют численность свыше 3 000 чел. [3]. При этом совокупный объем затрат на энергоснабжение всех потребителей 15 регионов Крайнего Севера равен 1,7 трлн руб. Значительная часть (две трети) расходов на энергоснабжение приходится на крупную промышленность и трубопроводные системы. Доходы коммунальных организаций от продажи электроэнергии, тепловой энергии и природного газа равны 464 млрд руб. Из них суммарные расходы бюджетов всех уровней на финансирование энергоснабжения регионов Крайнего Севера в 2016 году пришлось более 150 млрд руб. Доля расходов бюджета в оплате услуг энергоснабжающих организаций многих регионов Крайнего Севера превышает 30 %, а в ряде случаев – даже 60 % при среднем по России уровне около 20 %. Размеры перекрестного субсидирования и убытки компаний, снабжающих энергией потребителей Крайнего Севера, превышают 40 млрд руб. Примерно половина этой суммы приходится на субсидирование потребителей территорий с изолированными системами энергоснабжения. Практически во всех регионах Крайнего Севера (за исключением добывающих нефть и газ) доля расходов на энергоснабжение в ВРП составляет 20–37 % и кратно превышает пороги экономической доступности энергии, что не позволяет экономике динамично развиваться. Для населенных пунктов с изолированными системами энергоснабжения отношение расходов на энергоснабжение

к муниципальному продукту часто превышает 40 %. [4].

Таким образом, можно сделать вывод, что регионы Крайнего Севера и Арктики особенно нуждаются во внедрении инновационных энергоэффективных решений, а также современных автономных электростанций, использующих гораздо более дешевые возобновляемые источники энергии. Именно здесь, в этих регионах, введение технологий альтернативной возобновляемой энергетики должно не только окупаться, но и в значительной степени сократить бюджетные расходы на субсидирование энергопотребления. И потенциал такой модернизации лежит как раз в существующих на сегодняшний день высоких бюджетных затратах на энергоснабжение арктических регионов.

Мировой опыт внедрения возобновляемых источников энергии

Развитие возобновляемой энергетики сегодня – глобальный тренд, обусловленный как необходимостью обеспечения энергетической независимости стран и регионов, так и заботой об окружающей природной среде. По итогам прошедшего 2019 года потребление электроэнергии в Европе снизилось на 2% (-56 ТВт*ч), вернув спрос к уровню 2015 года. При этом валовой внутренний продукт ЕС за прошедший год вырос на 1,4%.

Доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в производстве европейской электроэнергии достигла рекордных 34,6%. Солнечная и ветровая энергетика совместно выработали почти 18% электроэнергии (569 ТВт*ч), впервые обогнав уголь по выработке электроэнергии. Доля возобновляемых источников энергии в общем объеме потребления электроэнергии по странам ЕС приведена на рис. 2. Из рисунка видно, что многие страны уже достигли поставленной на 2020 год цели, хотя год еще далеко не завершен.

Всего за один год производство электричества на основе угля в Европейском Союзе сократилось на 24%, и в 2019 году составило менее половины от уровня 2007 года. Выработка на основе каменного

угля сократилась на 32%, на основе бурого угля – на 16%. В результате выбросы CO2 в энергетическом секторе Европы в 2019 году снизились на 12% — самое большое падение по крайней мере с 1990 года.

Половина угольной генерации была заменена ветровой и солнечной энергией, а половина – природным газом. Доля ветровой и солнечной генерации выросла благодаря установке новых мощностей, а рост газовой генерации обусловлен более высокими ценами на CO2 и низкими ценами на газ, что повысило конкурентоспособность газовых электростанций по сравнению с угольными. Отметим, что в 2019 газовая генерация по объемам выработки была на 8% ниже рекордного уровня 2010 года.

Конечно, есть и особенности использования ВИЭ. Так, солнечные батареи бесполезны в пасмурную погоду и ночью, а ветряные электростанции простаивают в безветренную погоду. Но и в этих вопросах мировое энергетическое сообщество находится в постоянном поиске решений. Так, для накопления

выработанной электроэнергии разрабатываются все более совершенные аккумуляторные батареи, постоянно совершенствуются применяемые материалы и технологии, а для повышения эффективности генерации используются гибридные системы, объединяющие в себе ветряные турбины, солнечные батареи и, к примеру, дизель генератор. Такая система позволит нивелировать подъемы и спады энергии, получаемой на выходе от ветряных мельниц и солнечных батарей, и обеспечить общую надежность функционирования.

При этом не только Евросоюз демонстрирует высокий интерес к возобновляемым источникам энергии. По данным Bloomberg New Energy Finance тенденция повышения доли инвестиций в различного рода альтернативную энергетику наблюдается по всему миру. При этом, как видно из рисунка 3, постоянный и значительный рост демонстрирует ветроэнергетика – как один из наиболее эффективных и недорогих источников электроэнергии.

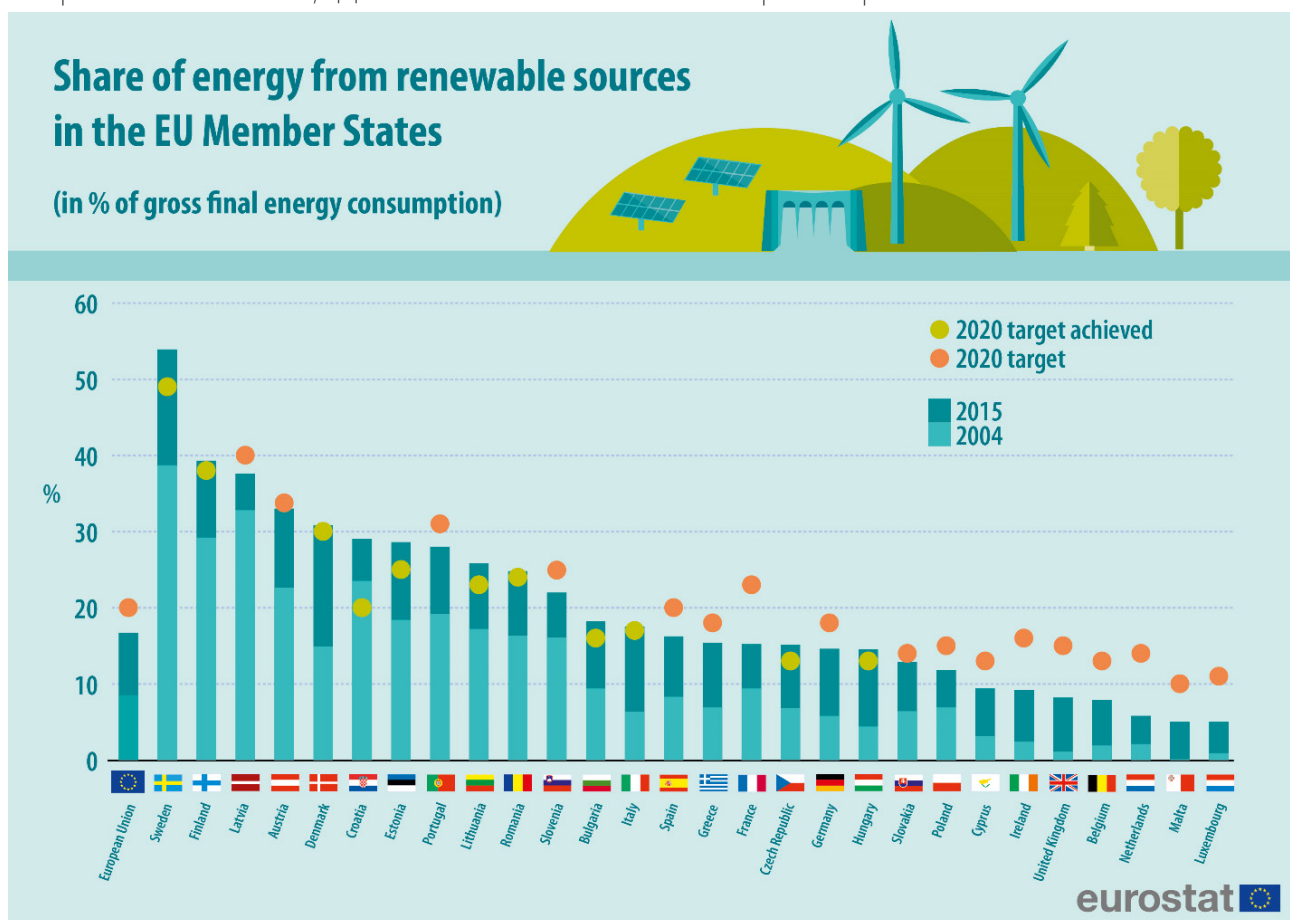


Рисунок 2 – Доля возобновляемых источников энергии в общем объеме потребления электроэнергии в ЕС: показатели на 2004г., 2015 г. и 2020г. (план и текущее значение)²

2 по данным ec.europa.eu/eurostat

Что немаловажно, и стоимость электроэнергии, полученной от ВИЭ, уже приблизилась, а во многих случаях ниже стоимости электроэнергии, полученной традиционными способами (при сжигании углеводородов). Показатель несубсидированной нормированной стоимости ветровой и солнечной энергии составляет сейчас 30–60 долл. США за 1 мегаватт-час (МВт·ч), что ниже диапазона цен на самое дешевое ископаемое топливо — природный газ (42–78 долл. США за 1 МВт·ч) [5].

По информации того же Bloomberg New Energy Finance, стоимость генерации для наземных ветроэнергетических установок и фотоэлектрических солнечных электростанций в первой половине 2018 года уже упала на 18% [6].

Возобновляемые источники энергии для Арктики

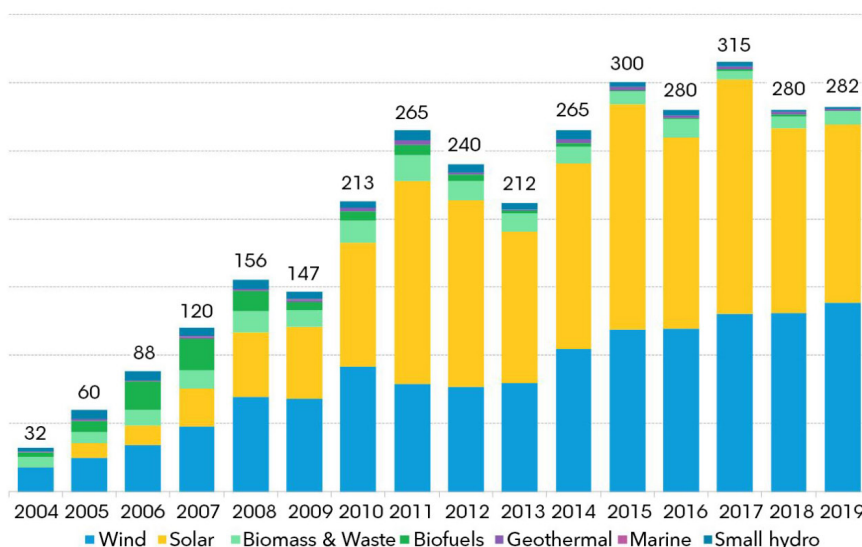
Возможности для развития ВИЭ в Арктике диктует сама природа. Так, в самых северных широтах есть потенциал для развития ветровой энергетики, а в ряде восточных приарктических регионов (например, в Якутии) — солнечной.

Ресурс ВИЭ в арктическом регионе значительный, и его реализация позволит уже в ближайшее время обеспечить 40-50% замену дизельного топлива, а в дальнейшем и больший объем. Важно заниматься изучением естественных и экономических возможностей для развития ВИЭ в каждом конкретном случае и принимать решение с учетом всех выявленных параметров и особенностей территории.

В настоящее время состояние технологий возобновляемой энергетики в России характеризуется их слабой развитостью, в особенности в регионах Крайнего Севера и Арктики. Однако значимость ВИЭ в Арктике возрастает именно в настоящее время, и, как уже было сказано выше, связана с высокой себестоимостью традиционных источников энергии, а также необходимостью снижения нагрузки на окружающую среду — одним из важнейших мировых трендов современности. Для роста числа проектов в сфере возобновляемой энергетики в Арктической зоне Российской Федерации необходима эффективная нормативно-правовая база, благоприятный инвестиционный и налоговый климат, а также высокий

Global renewable energy capacity investment, 2004 to 2019

\$ billion



Source: BloombergNEF. Note: The figures represent utility-scale asset finance of new wind, solar, biomass and waste-to-energy, geothermal, small hydro and marine power projects, plus small-scale solar systems. Prior years' totals have been revised in this round, to reflect new information. Totals are rounded to nearest billion dollars

Рисунок 3 – Доля мировых инвестиций в возобновляемую энергетику с 2004 по 2010 гг. в трл. долл. (ветер, солнце, биомасса и мусор, биотопливо, геотермальные источники, энергия приливов, малая гидроэнергетика)³.

³ По данным Bloomberg New Energy Finance за 2019 г.
© K.A. Zmieva

уровень государственной поддержки.

Рассмотрим существующую систему выработки электроэнергии из ВИЭ в Арктике.

Общей особенностью климата северных регионов является продолжительная зима (до 300 дней в году) с морозами, достигающими $-35-50^{\circ}\text{C}$. В короткий (около 3 месяцев) летний период температура только иногда поднимается до $+20^{\circ}\text{C}$. Устойчивые и сильные ветра наблюдаются здесь в большей степени зимой, а также в переходный период (весна и осень). А значит в северных регионах высок потенциал развития ветроэнергетики.

Существует два основных направления развития ветроэнергетики в условиях Крайнего Севера:

1. Использование малых ветроэнергетических установок (ВЭУ) для децентрализованных потребителей энергии, как отдельно, так и в составе гибридных энергоустановок (совместно с солнечными батареями и дизельными генераторами). Наиболее серьезным препятствием на пути развития малой ветроэнергетики является достаточно высокая стоимость ветряных установок. Сегодня это порядка 2-3 тыс. долларов США за 1 кВт установленной мощности. Но, как уже упоминалось выше, по опыту развитых стран, срок окупаемости таких установок составляет в среднем 5-6 лет. Т.о., малая ветроэнергетика нуждается в точечном софинансировании или субсидировании государством.
2. Применение ВЭУ в составе действующей развитой электросети. Большой опыт в данном вопросе накопили США и ЕС. По данным Deloitte Center for Energy Solutions (США), если ранее не удавалось обеспечить стабильность работы общей энергосистемы с применением ВЭУ, то сегодня все проблемы решены и рост доли солнечно-ветровой энергии сопровождается ростом надежности и устойчивости энергосистем [8]. ВИЭ либо практически не влияют на работу энергосистемы, либо требуют внесения

незначительных изменений в порядок эксплуатации и использования существующих энергоресурсов [9].

В условиях холодного климата применение энергии ветра имеет несколько положительных эффектов.

Во-первых, холодный воздух обладает большей плотностью, чем теплый. В связи с этим энергоэффективность установки при одной и той же скорости ветра будет выше. Мощность ВЭУ (кВт) рассчитывается следующим образом:

$$P = 4.81 * 10^{-4} E d^2 \rho \phi^3 \eta,$$

где E — коэффициент использования ветровой энергии (характеризует эффективность ветрового колеса и является функцией скорости ветра, угла закрутки лопасти колеса и угловой скорости вращения колеса), d — диаметр ветрового колеса, ρ — плотность воздуха, ϕ — скорость ветра, η — КПД генератора ВЭУ.

Из представленного уравнения следует, что мощность ветроэнергетической установки пропорциональна плотности воздуха ρ . Следовательно, при снижении температуры воздуха, например, с $+15$ до -15°C мощность установки возрастает на 11%. В то же время при падении атмосферного давления мощность ВЭУ также снижается (например, при падении давления с 770 до 730 мм ртутного столба мощность ВЭУ снижается на 6%). Такие зависимости говорят о том, что получение дополнительной мощности ВЭУ при нестабильных погодных условиях Арктики представляется достаточно трудным.

Во-вторых, северные регионы с холодным климатом и очень длинным отопительным периодом характеризуются высоким удельным потреблением электрической и тепловой энергии.

В-третьих, как уже говорилось выше, в северных регионах цены на электроэнергию и тепло на порядок выше, за счет использования на электростанциях привозного дизельного топлива, мазута и угля.

Все перечисленное должно стимулировать внедрение ВЭУ в локальные и централизованные системы энергоснабжения регионов Крайнего Севера. Следует особенно отметить, что в этих регионах

улучшение комфорта и жизненных условий населения имеет гораздо большее значение, чем в других регионах страны.

Очевидно, что для эффективной работы ветроэнергетических установок в условиях Севера требуется использование специальных материалов (хладостойкой стали, синтетической низкотемпературной смазки для подшипников, специальных жидкостей для гидравлических систем) и технологий эксплуатации (подогрева редуктора, лопастей и метеорологических датчиков для предотвращения оледенения и отложения изморози). Но даже эти необходимые действия не сделают себестоимость электроэнергии выше, чем при использовании традиционных источников ее выработки.

Можно подумать, что использование фотоэлементов (солнечной энергии) в Арктическом регионе нереалистично, но на самом деле это не так. Необходимо учитывать существование в Арктике эффекта альбедо (или коэффициента диффузного отражения, который у белого снега на порядок выше, чем у темных поверхностей), а также тот факт, что в холодном климате увеличивается потенциал производства солнечной энергии. Известно, что чем ниже окружающая температура, тем эффективнее становятся солнечные фотоэлементы (эффективность увеличивается на 0,5% °C). Так, при 0°C КПД фотоэлемента на 10% выше, чем при 20°C.

Однако в Полярную ночь (зимой) потенциал солнечной энергетики в арктическом регионе резко падает. Таким образом, энергетическая система Арктики, конечно, не может полностью зависеть от солнечной энергетики. Для наибольшей эффективности необходимо рассматривать гибридные системы (сочетание возобновляемых и традиционных источников энергии), о чем уже говорилось выше.

В настоящее время в арктической зоне строительство электростанций на основе возобновляемых источников энергии ведется точечно, во многих случаях в формате некоего эксперимента. Вот несколько примеров реализуемых в настоящий момент проектов ВИЭ в Арктике:

- Мебельная фабрика «Green House» (с 2015 г.) (г. Мурманск), мощность 500кВт.
- Рыболовно-туристический комплекс о. Мудьюг, система освещения (с 2014 г.), Архангельская обл., мощность 1,5 кВт.
- Проект «Полярис» (реализуется по международной программе Kolarctic), с 4-мя ветроэлектрическими установками (с 2016 г.), Ненецкий автономный округ, мощность 200кВт.
- Анадырская ветряная электростанция на мысе Обсервации Анадырского района, 10 ветрогенераторов (с 2002 г.), Чукотский автономный округ, 2МВт (рис. 4).



Рисунок 4 – Анадырская ветряная электростанция на мысе Обсервации Анадырского района (2 МВт)⁴

⁴ Фото <https://www.drive2.ru/c/468787778692318135/>
© K.A. Zmueva

- Экспериментальная ветроэнергетическая станция в г. Лабитнанги (с 2014 г.), Ямало-Ненецкий автономный округ, мощность 250кВт.
- Ветропарк в п. Тикси. Представляет собой технологический комплекс, где объединены ветроэнергетические установки, дизель-генераторы и система аккумулирования электроэнергии. В составе ветропарка 3 ветроустановки суммарной мощностью 900 кВт. Экономия дизельного топлива составляет 500 т в год [7].
- Ветроэлектрический парк «Заполярный», состоящий из 6 ветрогенераторов (с 1993 по 2014 г.), республика Коми, мощность 1,5мВт.
- Экспериментальная ветроэнергетическая станция «Быков мыс» в п. Тикси, республика Саха (Якутия), мощность 1,9 мВт.
- Солнечные фотоэлектрические электростанции в с. Дулгалах и с. Куду-Кюэль (с 2013 г.), п. Батамай (с 2011 г.), п. Джаргалах, с. Тойон-Ары (с 2014 г.), с. Куберганя, с. Эйик, с. Дельгей, п. Батагай, п. Бетенкес, с. Улуу, с. Юнкюр (рис. 5), с. Верхняя Амга, с. Столбы, с. Иннях (с 2015 г.), Ямало-Ненецкий автономный округ, суммарная мощность около 1,4 мВт.

Из приведенных данных видно, что в настоящий момент возобновляемая энергетика не обеспечивает и доли потребностей арктических регионов в электроэнергии. Несмотря на огромный потенциал возобновляемых источников энергии в Арктике, реализованных проектов все еще очень мало. По официальным данным, суммарные установленные мощности всех ветряных и солнечных электростанций Крайнего Севера не превышают 7-8 МВт, т.е. не сможет обеспечить электроэнергией даже одно из 1000 поселений с населением более 1 тыс. чел. Тем не менее, описанный выше положительный опыт стран ЕС, США и Японии говорит о том, что инвестирование в развитие ВИЭ является эффективным, а само развитие возобновляемой энергетики в Арктике приведет к экономическому росту региона, повышению привлекательности его для населения и снижению негативного воздействия на окружающую природную среду. К тому же, как следует из аналитики проф. И.А. Башмакова [3], при тарифах свыше 20 руб./кВт·ч практически все нынешние технологии возобновляемой энергетики конкурентоспособны, даже при дополнительных затратах на их северное исполнение.



Рисунок 5 – Солнечная электростанция. Село Юнкюр, Верхоянский район, республика Саха (Якутия)⁵.

Столь стремительный рост производства электроэнергии из возобновляемых источников в развитых странах мира стал возможен во многом благодаря созданию эффективной нормативно-правовой базы для регулирования деятельности участников энергетического рынка, внедрению значимых мер финансовой поддержки, налоговых льгот, а также супер современных инновационных технологий умных малых сетей (smart grid), автоматизации и технологий блокчейна. Для достижения максимального эффекта при внедрении ВИЭ в Российской Арктике имеет смысл, основываясь на достижениях отечественной науки, воспользоваться положительным опытом стран, успешно реализующих подобные проекты.

Выводы

Реализация программ повышения энергоэффективности и внедрение локальных электростанций на основе ВИЭ на территории арктических регионов позволит:

- снизить затраты на завоз традиционного топлива (дизель, мазут, уголь),
- снизить негативное воздействие на хрупкую природную среду Арктики,
- снизить тарифы на электроэнергию для населения, промышленных и муниципальных объектов,
- снизить затраты государства на субсидирование высоких тарифов на электроэнергию для населения, промышленных и муниципальных объектов,
- повысить надежность и стабильность работы энергосистем,
- повысить конкурентоспособность предприятий за счет снижения их затрат на энергоснабжение,
- повысить привлекательность Арктики для населения за счет более комфортных условий жизни и труда,
- снизить зависимость Арктики от «северного завоза».

Список литературы:

1. Змиева К.А. Энергосбережение в промышленности как ключевой механизм снижения энергоемкости ВВП России // Электротехнические комплексы и системы управления. 2013. № 3. С. 1-10.
2. Башмаков И.А. Повышение эффективности энергоснабжения в северных регионах России // Энергосбережение. 2017. № 3. С. 58-72.
3. Башмаков И.А., Дзедзичек М.Г. Оценка расходов на энергоснабжение в регионах Крайнего Севера // Энергосбережение. 2017. № 4. С. 40-51.
4. Башмаков И.А. Повышение эффективности энергоснабжения в северных регионах России // Энергосбережение. 2017. № 2. С. 46-53.
5. Lazard, Levelized Cost of Energy Analysis, Version 11.0, 2017, p. 2, <https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-11.0.pdf>
6. Bloomberg, "Fossil fuels squeezed by plunge in cost of renewables, BNEF says", Jeremy Hodges, 28.03.2018, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-03-28/fossil-fuels-squeezed-by-plunge-in-cost-of-renewables-bnef-says>
7. Потравный И.М., Яшалова Н.Н., Бороухин Д.С., Толстоухова М.П. Использование возобновляемых источников энергии в Арктике: роль государственно-частного партнерства // Экономика природопользования. 2020. Том 13. №1. С. 144-159.
8. Motyka M., Slaughter A., Amon C. Report for Deloitte Center for Energy Solutions «Global renewable energy trends. Solar and wind move from mainstream to preferred» // <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/power-and-utilities/global-renewable-energy-trends.html?id=gx:2el:3dc:4direnergy:5awa:6di:09132018>. 30p.
9. International Energy Agency, "Status of Power System Transformation 2018: Advanced Power Plant Transformation", 2018, p. 21 <https://doi.org/10.1787/9789264302006-en>

References:

1. Zmieva K.A. Energoberezhenie v promyshlennosti kak klyuchevoj mekhanizm snizheniya energoemkosti VVP Rossii // Elektrotekhnicheskie komplekxy i sistemy upravleniya. 2013. № 3. S. 1-10.
2. Bashmakov I.A. Povyshenie effektivnosti energosnabzheniya v severnyh regionah Rossii // Energoberezhenie. 2017. № 3. S. 58-72.
3. Bashmakov I.A., Dzedzichuk M.G. Ocenka raskhodov na energosnabzhenie v regionah Krajnego Severa // Energoberezhenie. 2017. № 4. S. 40-51.
4. Bashmakov I.A. Povyshenie effektivnosti energosnabzheniya v severnyh regionah Rossii // Energoberezhenie. 2017. № 2. S. 46-53.
5. Lazard, Levelized Cost of Energy Analysis, Version 11.0, 2017, p. 2, <https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf>
6. Bloomberg, "Fossil fuels squeezed by plunge in cost of renewables, BNEF says", Jeremy Hodges, 28.03.2018, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-03-28/fossil-fuels-squeezed-by-plunge-in-cost-of-renewables-bnef-says>
7. Potravnyj I.M., Yashalova N.N., Borouhin D.S., Tolstouhova M.P. Ispol'zovanie vozobnovlyaemyh istochnikov energii v Arktike: rol' gosudarstvenno-chastnogo partnerstva // Ekonomika prirodopol'zovaniya. 2020. Tom 13. №1. S. 144-159.
8. Motyka M., Slaughter A., Amon C. Report for Deloitte Center for Energy Solutions «Global renewable energy trends. Solar and wind move from mainstream to preferred» // <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/power-and-utilities/global-renewable-energy-trends.html?id=gx:2el:3dc:4direnergy:5awa:6di:09132018>. 30p.
9. International Energy Agency, "Status of Power System Transformation 2018: Advanced Power Plant Transformation", 2018, p. 21 <https://doi.org/10.1787/9789264302006-en>

ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПРИПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ НА РЕЖИМ ПЕРЕДАЧИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ

А.А. Кувшинов¹, В.В. Вахнина¹, А.Ю. Хренников², А.Н. Черненко¹

¹ ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти, Россия

² АО «Научно-технический Центр Федеральной сетевой компании ЕЭС»

✉ Ak2390@inbox.ru, AlekseiKuvshinov@yandex.ru, vvahnina@yandex.ru

Получены аналитические выражения для определения реактивной мощности в начале и в конце межсистемной воздушной линии с учетом параметров ветвей намагничивания силовых трансформаторов, позволяющие учитывать интенсивность воздействия геомагнитных возмущений на режимы электропередачи. Показано, что увеличение интенсивности геоиндуцированных токов способно полностью нарушить транзит реактивной мощности из-за многократного увеличения мощности намагничивания силовых трансформаторов в результате одностороннего насыщения магнитных систем. Приведен численный пример, иллюстрирующий возможность прекращения транзита реактивной мощности при достаточно интенсивных геомагнитных возмущениях.

Ключевые слова: воздушная линия, силовой трансформатор, геоиндуцированные токи, реактивная мощность.

INFLUENCE OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES IN THE POLAR REGIONS ON THE REACTIVE POWER TRANSMISSION MODE ON THE AIRLINE

Aleksey A. KUVSHINOV¹, Vera V. VAKHNINA¹, Alexander Yu. KHRENNIKOV², Aleksey N. CHERNENKO¹

¹ Togliatti State University, Togliatti, Russia

² Research and Development Center at Federal Grid Company of United Energy System, Moscow, Russia

Analytical expressions are obtained for determining reactive power at the beginning and at the end of an intersystem overhead line, taking into account the parameters of the magnetization branches of power transformers, which allow one to take into account the intensity of the influence of geomagnetic disturbances on power transmission modes. It is shown that an increase in the intensity of geo-induced currents can completely disrupt the transit of reactive power due to the multiple increase in the magnetization power of power transformers as a result of one-sided saturation of magnetic systems. A numerical example is given illustrating the possibility of terminating the transit of reactive power with sufficiently intense geomagnetic disturbances.

Keywords: overhead line, power transformer, geo-induced currents, reactive power.

Статья получена: 11.11.2019

Принята к публикации: 04.12.2019

Опубликована онлайн: 26.03.2020

Введение. Многолетние наблюдения отмечают около 2500 геомагнитных возмущений, идентифицируемых как «магнитная буря» и «сильная магнитная буря» в течение 11-летнего цикла солнечной активности [1-4]. Геомагнитные возмущения вызывают протекание геоиндуцированных токов (ГИТ) в заземленных обмотках высокого напряжения (ВН) силовых трансформаторов электрических сетей с номинальным напряжением 110 кВ и выше. Под воздействием ГИТ режим перемагничивания электротехнической стали силовых трансформаторов с бронестержневой и бронеовой конструкцией магнитной системы смещается в область технического насыщения [5,6]. Возникает одностороннее насыщение магнитной системы силового трансформатора. В результате ток намагничивания приобретает практически однополярную форму и многократно превышает номинальный ток холостого хода [7]. Мощность намагничивания силового трансформатора также многократно возрастает, оказывая существенное влияние на баланс реактивных мощностей в воздушных линиях электропередачи [8,9]. В частности, ГИТ, вызванные в электроэнергетической системе Hydro-Quebec

Канады геомагнитной бурей 22 октября 1999 г., послужили причиной увеличения потерь реактивной мощности с последующим развитием лавины напряжений [10,11].

Таким образом, задача исследования механизмов влияния ГИТ, вызванных геомагнитными возмущениями, на режимы передачи реактивной мощности по воздушной линии является актуальной, причем особую актуальность данная задача приобретает для высокоширотных линий электропередачи.

Расчетная схема межсистемной электропередачи. Расчетная схема (а) и схема замещения (б) межсистемной воздушной линии (ВЛ), связывающей две электроэнергетические системы ЭЭС₁ и ЭЭС₂, показаны на рис.1. Нейтрали обмоток высокого напряжения (ВН) силовых трансформаторов T_1 и T_2 заземлены. Геомагнитные возмущения инициируют возникновение на поверхности земли квазипостоянного геоэлектрического поля и соответственно разности потенциалов между заземляющими устройствами нейтралей обмоток ВН силовых трансформаторов T_1 и T_2 , которая учитывается в расчетной схеме источником квазипостоянной ЭДС ($e_{ГИТ}$ на рис.1,а).

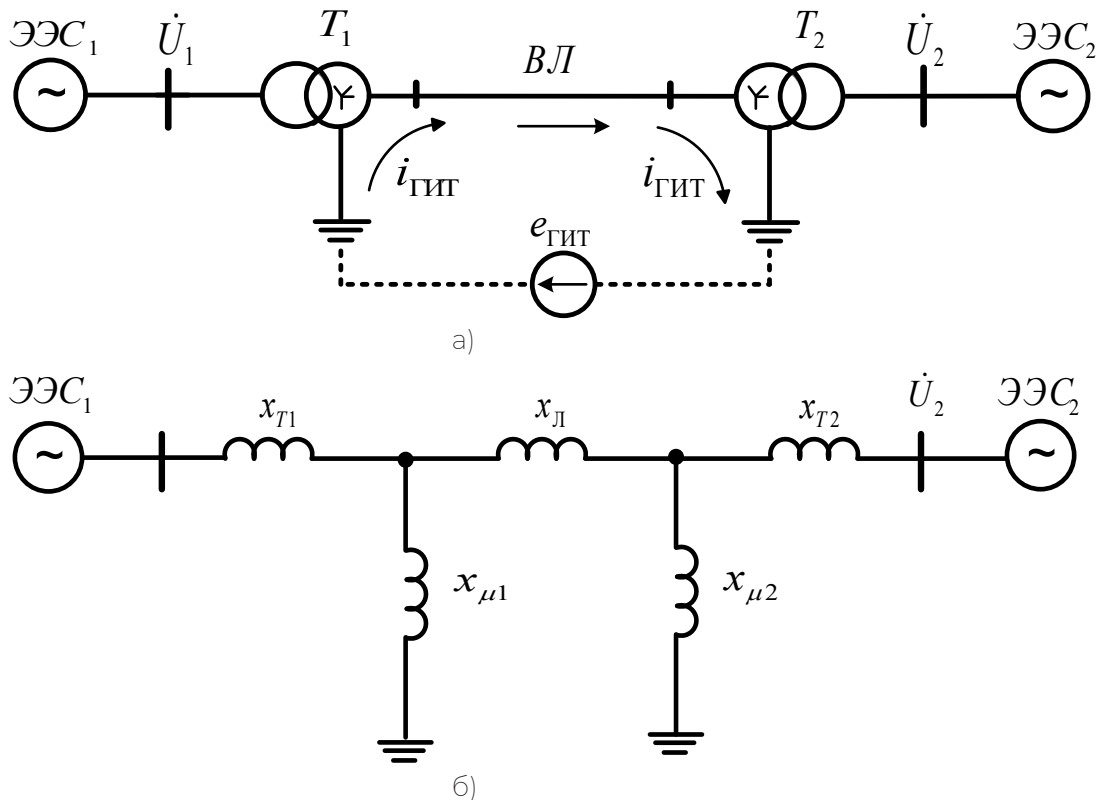


Рисунок 1 – Расчетная схема (а) и схема замещения (б) межсистемной ВЛ.

Под воздействием квазипостоянной ЭДС по обмоткам ВН силовых трансформаторов T_1 и T_2 и фазным проводам ВЛ протекают ГИТ по контуру, показанному на рис.1,а.

На рис. 1,б представлена схема замещения, в которой силовые трансформаторы T_1, T_2 представлены упрощенной Г-образной схемой замещения, для количественных оценок вариаций режима передачи реактивной мощности под воздействием ГИТ. На схеме замещения использованы следующие обозначения:

$x_{л1}$ - индуктивное сопротивление фазных проводов ВЛ;

$x_{т1}, x_{т2}$ - индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания силовых трансформаторов T_1, T_2 соответственно;

$x_{\mu 1}, x_{\mu 2}$ - индуктивное сопротивление намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 соответственно;

\dot{U}_1, \dot{U}_2 - напряжения на шинах ЭЭС₁ и ЭЭС₂ соответственно.

Потери активной мощности в фазных проводах ВЛ и силовых трансформаторах T_1, T_2 не учитываются. ГИТ, протекая по заземленным обмоткам ВН, вызывают одностороннее насыщение магнитных систем силовых трансформаторов T_1 и T_2 . Данное обстоятельство обуславливает уязвимость рассматриваемой ВЛ к воздействию ГИТ, результатом которого является многократное уменьшение индуктивных сопротивлений $x_{\mu 1}, x_{\mu 2}$ ветвей намагничивания силовых трансформаторов T_1 и T_2 из-за существенной нелинейности основной кривой намагничивания электротехнической стали магнитной си-

стемы [12]. Именно изменение индуктивных сопротивлений ветвей намагничивания силовых трансформаторов T_1 и T_2 является фактором, определяющим существенное влияние ГИТ на режимные параметры электропередачи.

Потоки реактивной мощности по межсистемной воздушной линии.

Комплексы токов электрических сетей ЭЭС₁ (\dot{I}_1) ЭЭС₂ (\dot{I}_2) определяются системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{U}_1 \cdot \dot{Y}_{11} - \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_{12} \\ \dot{I}_2 &= \dot{U}_1 \cdot \dot{Y}_{21} - \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_{22} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где \dot{Y}_{11} – комплекс собственной проводимости ветви ЭЭС₁ при отсутствии источника напряжения;

$\dot{U}_2; \dot{Y}_{22}$ – комплекс собственной проводимости ветви ЭЭС₂ при отсутствии источника напряжения;

$\dot{U}_1; \dot{Y}_{12}$ – комплекс взаимной проводимости ветвей ЭЭС₁ и ЭЭС₂.

Комплексы собственных и взаимной проводимостей будут определяться выражениями

$$\dot{Y}_{11} = y_{11} \cdot e^{-j90},$$

$$\dot{Y}_{22} = y_{22} \cdot e^{-j90},$$

$$\dot{Y}_{12} = y_{12} \cdot e^{-j90},$$

а модули собственных и взаимной проводимостей – выражениями

$$y_{11} = \frac{(x_2 + x_{\mu(\text{ЭЭС})})}{(x_1 + x_2 + x_1 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})} + x_2 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})}),$$

$$y_{22} = \frac{(x_1 + x_{\mu(\text{ЭЭС})})}{(x_1 + x_2 + x_1 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})} + x_2 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})}), \quad (2)$$

$$y_{12} = y_{21} = \frac{x_{\mu(\text{ЭЭС})}}{(x_1 + x_2 + x_1 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})} + x_2 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})}),$$

где
$$x_1 = \frac{x_L \cdot x_{\mu 1}}{x_{\mu 1} + x_L + x_{\mu 2}},$$

$$x_2 = \frac{x_L \cdot x_{\mu 2}}{x_{\mu 1} + x_L + x_{\mu 2}},$$

$$x_{\mu(\text{ЭКВ})} = \frac{x_{\mu 1} \cdot x_{\mu 2}}{x_{\mu 1} + x_L + x_{\mu 2}}.$$

Анализ выражений (2) позволяет заключить, что собственные y_{11} , y_{22} и взаимная y_{12} , проводимости межсистемной электропередачи также зависят от величины ГИТ. Поэтому в условиях геомагнитных возмущений поддержания неизменными напряжений $U_1 = \text{const}$, $U_2 = \text{const}$ на шинах ЭЭС₁, ЭЭС₂ недостаточно, как показывает выражение (1), для сохранения неизменными комплексов токов \dot{I}_1 , \dot{I}_2 и следовательно режима передачи активной и реактивной мощности по межсистемной электропередаче. На рис.2 представлены кривые, показывающие характер изменения эквивалентного индуктивного сопротивления ветвей

намагничивания силовых трансформаторов T_1 и T_2 в зависимости от глубины насыщения магнитных систем под воздействием ГИТ, которая определяется величиной фазового угла насыщения.

В качестве количественного критерия глубины насыщения магнитной системы силового трансформатора использована величина фазового угла насыщения (φ), определяющего продолжительность однополярных бросков тока намагничивания на периоде напряжения при воздействии ГИТ [8]. С помощью выражений (1) можно определить величину реактивной мощности, выдаваемой ЭЭС₁

$$Q_1 = U_1^2 \cdot y_{11} - U_1 \cdot U_2 \cdot y_{12} \cdot \cos \delta \quad (3)$$

и величину реактивной мощности, поступающую в ЭЭС₂

$$Q_2 = U_1 \cdot U_2 \cdot y_{12} \cdot \cos \delta - U_2^2 \cdot y_{22}, \quad (4)$$

где δ - угол между векторами напряжений ЭЭС₁ и ЭЭС₂.

Сравнивая (3) и (4), видно, что ЭЭС₁ выдает, а ЭЭС₂ потребляет реактивную мощность, т.е. знаки Q_1 и Q_2 противоположны.

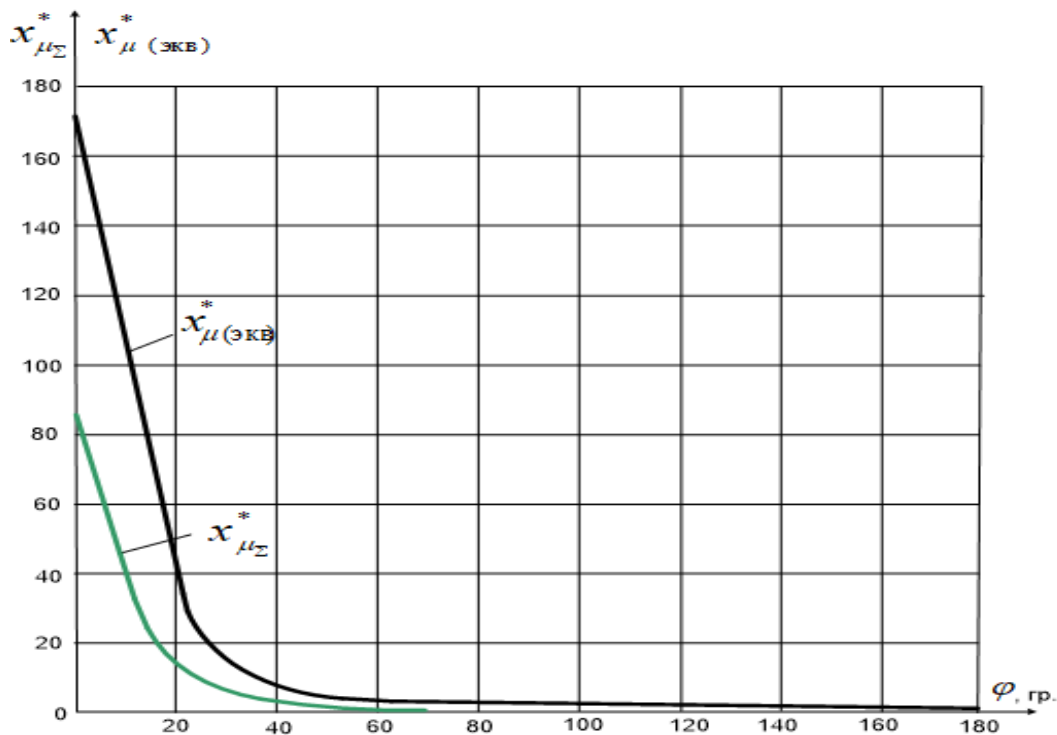


Рисунок 2 – Зависимость эквивалентного индуктивного сопротивления ($x_{\mu(\text{ЭКВ})}^*$) ветви намагничивания одного силового трансформатора и двух однотипных силовых трансформаторов ($x_{\mu\Sigma}^*$) от фазового угла насыщения магнитной системы.

Тогда потери реактивной мощности в индуктивных сопротивлениях электропередачи будут определяться алгебраической суммой

$$\Delta Q = Q_1 + Q_2 = U_1^2 \cdot y_{11} - U_2^2 \cdot y_{22}, \quad (5)$$

т.е. при $U_1^2 \cdot y_{11} > U_2^2 \cdot y_{22}$ потери покрываются за счет реактивной мощности ЭЭС₁, а при $U_1^2 \cdot y_{11} < U_2^2 \cdot y_{22}$ потери покрываются за счет потребления реактивной мощности из ЭЭС₂.

Анализ полученных выражений позволяет отметить, что неизменные значения режимных параметров ($U_1 = const, U_2 = const, \delta = const$) не обеспечат в условиях геомагнитных возмущений сохранение режима передачи реактивной мощности.

На рис. 3 представлены энергетические диаграммы баланса реактивных мощностей электропередачи при отсутствии и при различных уровнях геомагнитных возмущений и соответственно ГИТ. Энер-

гетические диаграммы построены для случая работы ВЛ в натуральном режиме, когда мощность магнитного поля линии равна мощности электрического поля ($Q_M = Q_{ЭЛ}$), т.е. линия не потребляет и не генерирует реактивную мощность. При отсутствии геомагнитных возмущений $i_{ГИТ} = 0$, реактивной мощности Q_1 ЭЭС₁, определяемой выражением (3), достаточно для создания мощности намагничивания силовых трансформаторов $T_1, T_2, Q_{\mu 1}(i_{ГИТ}), Q_{\mu 2}(i_{ГИТ})$ соответственно и выдачи реактивной мощности Q_2 в приемную ЭЭС₂.

По мере увеличения ГИТ возрастает мощность намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 настолько, что наступает равенство

$$Q_1 = Q_{\mu 1}(i_{ГИТ}) + Q_{\mu 2}(i_{ГИТ}),$$

т.е. вся реактивная мощность ЭЭС₁ расходуется только на покрытие мощности намагничивания. В приемную ЭЭС₂ реактивная мощность не отдается, т.е. $Q_2 = 0$ (рис.3,б).

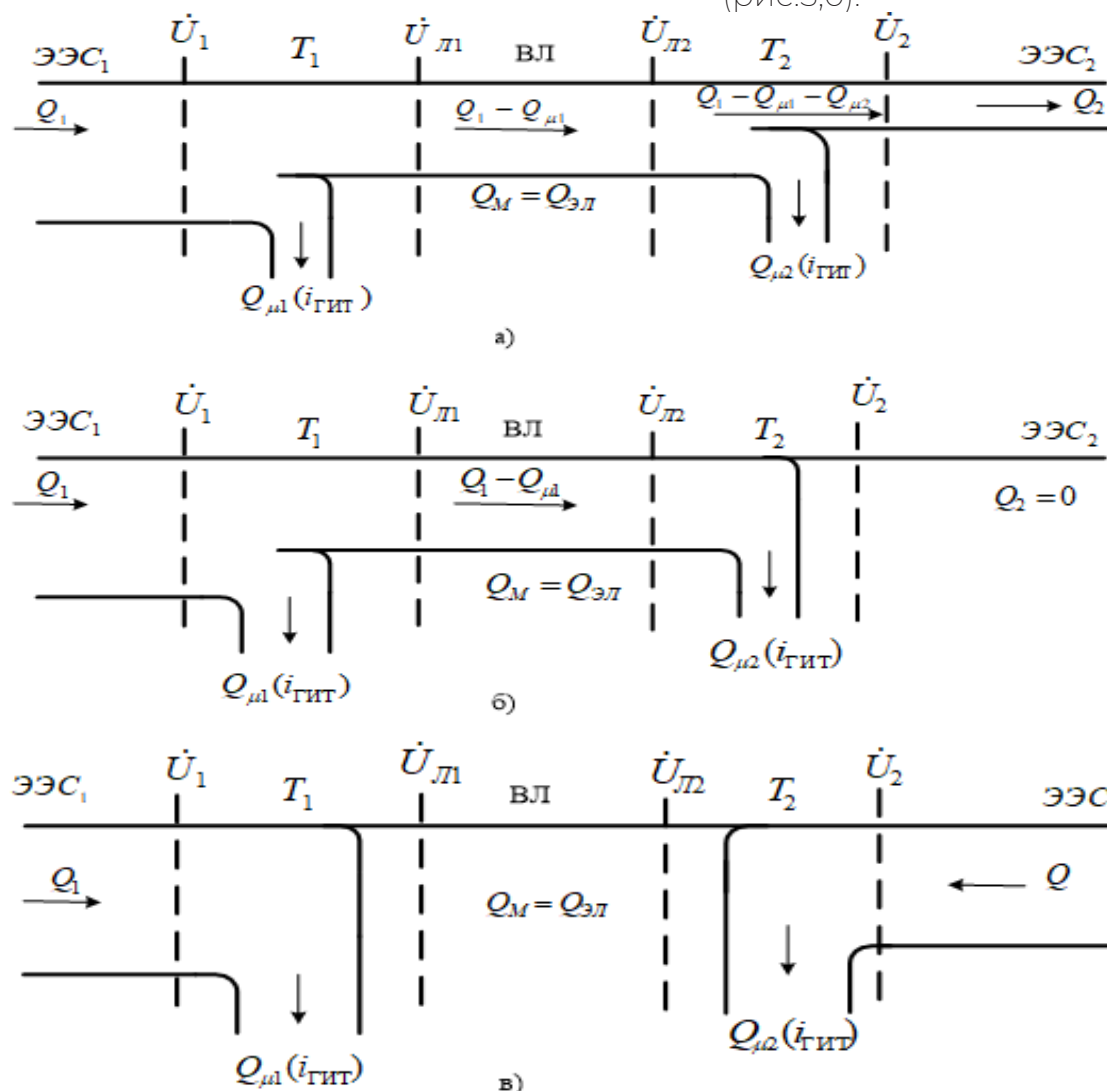


Рисунок 3 – Энергетические диаграммы потоков реактивной мощности в электропередаче при:
 а) $i_{ГИТ} = 0$;
 б) $i_{ГИТ} = I_{ГИТ1}$;
 в) $i_{ГИТ} = I_{ГИТ2} > I_{ГИТ1}$

При дальнейшем увеличении ГИТ возможно увеличение мощности намагничивания силового трансформатора T_1 до уровня (рис.3,в)

$$Q_{\mu 1}(i_{ГИТ}) = Q_1.$$

В этом случае для поддержания уровня напряжения U_2 в конце линии мощность намагничивания силового трансформатора T_2 должна покрываться потреблением реактивной мощности из приемной ЭЭС, т.е.

$$Q_{\mu 2}(i_{ГИТ}) = Q_2,$$

которая должна обладать соответствующим резервом реактивной мощности.

На рис.4 представлены графики изменения суммарной мощности намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 (кривая 1), реактивной мощности, выдаваемой ЭЭС₁ (кривая 2) и потребляемой, а затем и выдаваемой ЭЭС₂ (кривая 3) в зависимости от интенсивности геомагнитных возмущений, возрастание которой вызывает увеличение фазового угла насыщения (φ) магнитных систем силовых трансформаторов T_1, T_2 . Зависимости построены с помощью выражений (3), (4) и (5) для слабо загруженной ($P_2^* = 0,1347$) и сравнительно «короткой» линии электропередачи, которая имеет следующие параметры

$$x_{T1}^* = x_{T2}^* = 0,08; x_{\mu 1}^* = x_{\mu 2}^* = 174,64; x_{Л}^* = 0,0506 (50км).$$

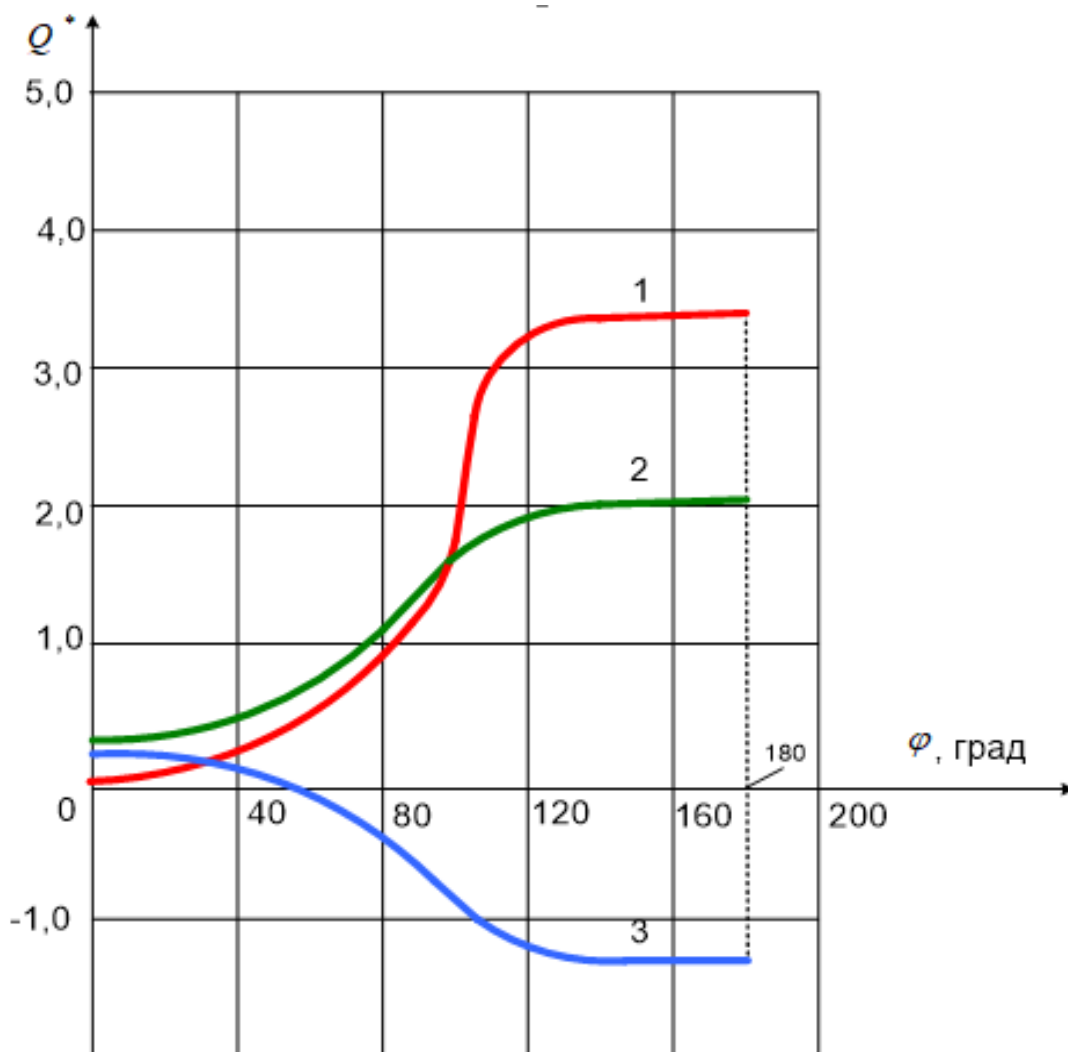


Рисунок 4 – Энергетические характеристики электропередачи при воздействии ГИТ (1 – суммарная мощность намагничивания силовых трансформаторов; 2 – реактивная мощность, выдаваемая ЭЭС₁; 3 – реактивная мощность, выдаваемая (потребляемая из) ЭЭС₂).

Представленные численные значения приведены к номинальным параметрам силовых трансформаторов. Индуктивные сопротивления ветвей намагничивания $X_{\mu 1}, X_{\mu 2}$, силовых трансформаторов T_1, T_2 указаны для режима нормального перемещения магнитных систем при отсутствии геомагнитных возмущений ($i_{ГИТ} = 0$). Как видно, по мере увеличения ГИТ и соответственно фазового угла насыщения магнитной системы силовых трансформаторов T_1, T_2 многократно возрастает суммарная мощность намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 (кривая 1) от значения $Q_{\mu\Sigma}^* \cong 0,008$ при $\varphi = 0\text{гр.}$ до значения $Q_{\mu\Sigma}^* \cong 1,0$ при $\varphi \cong 84\text{гр.}$ т.е. фактически до значения номинальной мощности силового трансформатора [13, 14].

Дальнейшее увеличение интенсивности ГИТ и фазового угла насыщения от значения $\varphi \cong 84\text{гр.}$ до значения $\varphi \cong 120\text{гр.}$ сопровождается еще более резким увеличением суммарной мощности намагничивания, вплоть до значения $Q_{\mu\Sigma}^* \cong 3,2$, т.е. почти трехкратного значения номинальной мощности силового трансформатора. При $\varphi \geq 120\text{гр.}$ суммарная мощность намагничивания силовых трансформаторов возрастает только на 6%.

Увеличение суммарной мощности намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 при возрастании интенсивности геомагнитных возмущений вызывает увеличение потребляемой из ЭЭС₁ реактивной мощности (кривая 2) и уменьшение реактивной мощности, поступающей в ЭЭС₂ (кривая 3). Наконец, при $\varphi \cong 50\text{гр.}$ выдача реактивной мощности в ЭЭС₂ прекращается и практически вся реактивная мощность, выдаваемая ЭЭС₁, расходуется на покрытие мощности намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 и только $\approx 19\%$ на покрытие потерь реактивной мощности в продольных индуктивных сопротивлениях межсистемной электропередачи. Данная ситуация соответствует энергетической диаграмме, изображенной на рис.3,б. При $\varphi \cong 50\text{гр.}$ реактивная мощность начинает потребляться и из ЭЭС₂. С этого

момента возрастающая мощность намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 , а также и потери реактивной мощности в продольных индуктивных сопротивлениях электропередачи начинают покрываться за счет потребления реактивной мощности как из ЭЭС₁, так и из ЭЭС₂ (см. также энергетическую диаграмму на рис.3,в). В частности, при $\varphi = 180\text{гр.}$ суммарная мощность намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 на $\approx 60\%$ покрывается потреблением реактивной мощности из ЭЭС₁ и на $\approx 40\%$ потреблением реактивной мощности из ЭЭС₂. Однако это возможно только при наличии соответствующих резервов реактивной мощности. В противном случае геомагнитные возмущения при достаточной интенсивности способны инициировать развитие аварийной ситуации типа «лавина напряжения».

Заключение. В неразветвленной схеме передачи электроэнергии поток реактивной мощности в приемную систему существенно зависит от интенсивности геомагнитных возмущений, поскольку увеличение ГИТ способно вызвать многократное увеличение мощности намагничивания силовых трансформаторов повышающей и понижающей подстанций до значений достигающих и даже превышающих собственную номинальную мощность. По мере увеличения ГИТ уменьшается пропускная способность воздушной линии, а поток реактивной мощности в приемную систему уменьшается вплоть до полного прекращения и последующей инверсии направления передачи.

Список литературы:

1. Заболотная Н.А. Индексы геомагнитной активности. – Справочное пособие. Изд. 2-е, перераб., М.: Издательство ЛКИ, 2007, 88с.
2. Тертышников А.В. Возможные коррективы опасных гелиогеофизических явлений. – Гелиогеофизические исследования, выпуск 5, 2013, с.34-42.
3. Messerotti M. The NOAA Space Weather Scale tables. –COST Action 724, Athens, 11 October, 2005, p.1-4.
4. NOAA Space Weather Scales [Электронный ресурс]. URL: <http://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/NOAAscales.pdf> (дата обращения: 21.11.2016).
5. Coles R.L., Thompson K., Jansen van Beek G. A Comparison between the Rate of Change in the Geomagnetic Field and the Geomagnetically Induced Currents in a Power Transmission System. – Proceedings: Geomagnetically Induced Currents Conference, TR-100450, Electric Power Research Institute. Palo Alto. California, 1992.
6. Kappenman J.C., Albertson V.D. Bracing for the Geomagnetic Storm. – IEEE Spectrum, 1990, 28, №3.
7. Takasu N., Oshi T., Miyawaki F., Saito S., Fujiwara Y. An Experimental Analysis of Excitation of Transformers by Geomagnetically Induced Currents. – IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, Vol. 9, №2.
8. Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Черненко А.Н. Влияние геомагнитной активности на мощность намагничивания силовых трансформаторов электрических сетей. – Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2016, №2.
9. Вахнина В.В. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий : учебное пособие. – Тольятти, Изд-во ТГУ, 2011.
10. Kappenman J.C. Advanced Geomagnetic Storm Forecasting: A Risk Management Tool for Electric Power Operations. – IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue on Space Plasmas, 2000, Vol. 28, №6.
11. Boteller D.H. Effects of geomagnetically induced current in B. C. Hydro 500 kV – System. – IEEE Trans. On Power Delivery, 1989, 4, №1, p. 818-823.
12. Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Селемир В.Д., Карелин В.И. Пропускная способность межсистемных электропередач в условиях геомагнитной активности. – Электричество, 2016, №9.
13. Хренников А.Ю. Высоковольтное электротехническое оборудование в электроэнергетических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг. Учебное пособие, Магистратура — М.: ИНФРА-М, 2019- 186с., ил.
14. Khrennikov A.Yu., Kuvshinov A.A., Shkuropat I.A. Providing Reliable Operation of Electric Networks// Nova science publishers, New York, 2019, USA, p. 308, ISBN: 978-1-53615-422-1 <https://novapublishers.com/shop/providing-reliable-operation-of-electric-networks/>

References:

1. Zabolotnaya N.A. Indices of geomagnetic activity. - Reference manual. Ed. 2nd, revised., M.: Publishing house LKI, 2007, 88 pp.
2. Tertyshnikov A.V. Possible corrections of dangerous heliogeophysical phenomena. - Heliogeophysical research, issue 5, 2013, p. 34-42.
3. Messerotti M. The NOAA Space Weather Scale tables. –COST Action 724, Athens, October 11, 2005, p.1-4.
4. NOAA Space Weather Scales [Electronic resource]. URL: <http://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/NOAAscales.pdf> (accessed: 11.21.2016).
5. Coles R. L., Thompson K., Jansen van Beek G. A Comparison between the Rate of Change in the Geomagnetic Field and the Geomagnetically Induced Currents in a Power Transmission System. - Proceedings: Geomagnetically Induced Currents Conference, TR-100450, Electric Power Research Institute. Palo Alto. California, 1992.
6. Kappenman J.C., Albertson V.D. Bracing for the Geomagnetic Storm. - IEEE Spectrum, 1990, 28, No. 3.
7. Takasu N., Oshi T., Miyawaki F., Saito S., Fujiwara Y. An Experimental Analysis of Excitation of Transformers by Geomagnetically Induced Currents. - IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, Vol. 9, No. 2.
8. Vakhnina V.V., Kuvshinov A.A., Chernenko A.N. The effect of geomagnetic activity on the magnetization power of power transformers in electric networks. - Electro. Electrical Engineering, Electric Power Industry, Electrical Engineering Industry, 2016, No. 2.
9. Vakhnina V.V. Reactive Power Compensation in Power Supply Systems of Industrial Enterprises: A Training Manual. - Tolyatti, TSU Publishing House, 2011.
10. Kappenman J.C. Advanced Geomagnetic Storm Forecasting: A Risk Management Tool for Electric Power Operations. - IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue on Space Plasmas, 2000, Vol. 28, No. 6.
11. Boteller D.H. Effects of geomagnetically induced current in B. C. Hydro 500 kV - System. - IEEE Trans. On Power Delivery, 1989, 4, No. 1, p. 818-823.
12. Kuvshinov A.A., Vakhnina V.V., Selemir V.D., Karelin V.I. The capacity of intersystem power transmission in conditions of geomagnetic activity. - Electricity, 2016, No. 9.
13. Khrennikov A.Yu. High-voltage electrical equipment in electric power systems: diagnostics, defects, damage, monitoring. Textbook, Master's program - M.: INFRA-M, 2019 - 186p., ill.
14. Khrennikov A.Yu., Kuvshinov A.A., Shkuropat I.A. Providing Reliable Operation of Electric Networks // Nova science publishers, New York, 2019, USA, p. 308, ISBN: 978-1-53615-422-1 <https://novapublishers.com/shop/providing-reliable-operation-of-electric-networks/>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Р.Н. Шульга¹, Т. С. Смирнова¹

¹ Всероссийский электротехнический институт-филиал федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр- Всероссийский научно- исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина», г. Москва

✉ rnshulga@vei.ru

Рассмотренные характеристики Северного морского пути (СМП), атомных ледоколов и их судовой энергетики показывают целесообразность энергоснабжения береговых потребителей с использованием судовых реакторных устройств (РУ) типа атомных станций малой мощности (АСММ), что позволяет унифицировать и тиражировать энергоустановки. Для Арктики и СМП применение АСММ, дополненной шиной постоянного тока и наличием накопителей, является безальтернативным решением в части автономии, снижения выброса диоксидов углерода и азота, отсутствием обслуживания и дистанционным цифровым управлением. Рассмотренные альтернативные варианты энергообеспечения стационарных и мобильных установок наземного, надводного и подводного базирования на сжиженном природном газе (СПГ) предусматривают использование авиационных газовых турбин мощностью до 5 МВт, а для установок морского базирования корабельных газовых турбин мощностью от 30 МВт с применением накопителей электроэнергии, мощность которых зависит от пиковой мощности потребителей. Приведены структура и состав мобильного модульного комплекса жизнеобеспечения (ММКЖ) в составе подводного или надводного энергомодуля с управляемым выпрямителем, выход которого соединен биполярным подводным кабелем постоянного тока с береговыми модулями преобразования, накопления и распределения. Выходы последнего наземными биполярными кабелями связаны со входами модулей водоподготовки и воздухоподготовки, а также производственными и вспомогательными модулями. Комплекс напряжением от 1 до 10 кВ мощностью от 1 до 10 МВт создается с использованием преобразователей тока и напряжения, накопителей электроэнергии, выключателей и кабелей постоянного тока, оснащается цифровыми устройствами управления.

Ключевые слова: атомный ледокол, энергоснабжение, энергоустановка, шина постоянного тока, накопитель электроэнергии, жизнеобеспечение.

USE OF SHIP POWER FOR LIFE SUPPORT OF ARCTIC FACILITIES

R.N. Shulga¹, T. S. Smirnova¹

¹ All-Russian Electrotechnical Institute-Branch of Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics named after Academician E. I. Zababakhin,» Moscow, Russia

The considered characteristics of the Northern sea route (NSR), nuclear icebreakers and their ship power engineering show expediency of power supply of coastal consumers with use of ship reactor devices (RU) of type of nuclear power plants of small power (ASMM) that allows to unify and replicate power installations. For the Arctic and the NSR, the use of ASMM, supplemented by a DC bus and the presence of storage devices is an alternative solution in terms of autonomy, reducing the emission of carbon dioxide and nitrogen, lack of maintenance and remote digital control. The alternative options of energy supply stationary and mobile installations of ground, surface, and submarine-based liquefied natural gas (LNG) include the use of aviation gas turbines

up to 5 MW, and for sea-based vehicular gas turbines of 30 MW using energy storage devices, the capacity of which depends on the peak power of the consumers. The structure and composition of a mobile modular life support complex (MMCF) as part of an underwater or surface power module with a controlled rectifier, the output of which is connected by a bipolar underwater DC cable to the shore conversion, accumulation and distribution modules, are presented. The outputs of the latter are connected by ground bipolar cables to the inputs of the water and air treatment modules, as well as production and auxiliary modules. The complex with voltage from 1 to 10 kV with power from 1 to 10 MW is created using current and voltage converters, energy storage, switches and DC cables, equipped with digital control devices. The possibility of terminating the transit of reactive power with sufficiently intense geomagnetic disturbances.

Keywords: nuclear icebreaker, power supply, power plant, DC bus, electricity storage, life support.

Статья получена: 05.11.2019

Принята к публикации: 11.12.2019

Опубликована онлайн: 25.03.2020

Характеристики северного морского пути и осваиваемых территорий

Северный морской путь (СМП), так же, как и Арктика – это национальный и глобальный проект России в 21-ом веке, который требует мобилизации всех ресурсов страны, освоения новых технологий для достижения главной задачи: подъема экономики, повышения благосостояния народа и защиты северных рубежей протяженностью 23 тыс. км. Протяженность СМП от проливов архипелага Новая

Земля и бухтой Провидения (Тихий Океан) – 5600 км. Маршрут охватывает 5 морей и 10 портов от Мурманска до бухты Провидения с добавлением новых портов Сабетта, Хатанга и др. для вывоза нефти, сжиженного природного газа (СПГ), угля (антрацита) с Таймыра, руды и золота. Схема СМП, приведенная на (рис. 1), достаточно наглядно показывает направление потока грузов в обоих направлениях, что важно для круглогодичной эксплуатации СМП.



Рисунок 1 – Схема СМП с обозначением основных портов и выгоды его использования [1].

Расстояние от Санкт-Петербурга до Владивостока через СМП – 14 тыс. км, а через южные моря и Суэцкий канал – 23 тыс. км, и, соответственно, фрахт занимает 23 суток против 45 суток. Грузооборот СМП резко нарастает, и если в 2013 г. он составлял 2,8 млн. т, то в 2016 г. – 6,9 млн. т, а в 2020 г. составит 30 млн. т, причем из них 16 млн. т – вывоз из «Ямал-СПГ». К 2030 г. вывоз угля из Таймыра в Китай достигнет 30 млн. т. При круглогодичной навигации к 2021 г. ожидается перевозка до 40 млн. т, а к 2025 г. – до 75 млн. т. [1]

Сегодня, по словам генерального директора ФГУП «Атомфлот» В. Рукши, объем вывоза СПГ должен составить 40 млн. т, газового конденсата – 5 млн. т. Себестоимость доставки 1 т СПГ в порт Кобе (Япония) через Суэц – 96 долл., а по СМП – 58 долл.; в порт Яньтань (Китай) – 91 долл., а по СМП – 64 долл. Разница в 20-25 долл. за тонну позволяет нарастить парк ледоколов и инфраструктуру портов. [1]

Богатства недр шельфа и арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) столь значительны, что возникает задача их освоения и защиты в условиях потепления климата [2]. Карта (рис. 2) показывает лицензионные участки (ЛУ) на

шельфе АЗРФ и др. морях «ПАО «НК Роснефть», которые дают представление о перспективах освоения СМП только по нефти. Вывоз нефти из Карского моря через Хатангу на уровне 50 млн. требует использования танкеров водоизмещением по 100 тыс. тонн для прохода от Обской губы до Сабетты [2].

Западно-Приновоземельский ЛУ содержит 1,4 млрд. т нефти и 1,8 трлн. куб. м газа, Восточно-Приновоземельский ЛУ – 130 млн. т нефти и 500 млрд. куб. м газа [2].

Штокмановское месторождение объемом 4 трлн. куб. м газа и 60 млн. т газового конденсата является крупнейшим в мире [2].

Павловское рудно-металлическое месторождение на острове Южный (архипелаг Новая Земля) входит в пятерку крупнейших в РФ, принадлежит «Атомредметзолоту» и должно давать до 70 тыс. т цинкового концентрата в год. Предполагаемая смета горно-обогатительного комбината (ГОК) – 22 млрд. руб., порта – до 6 млрд. руб. Освоение предполагается к 2019-2021 гг., потребляемая мощность – до 40 МВт, персонал – 500 человек, работающих вахтовым методом [3].

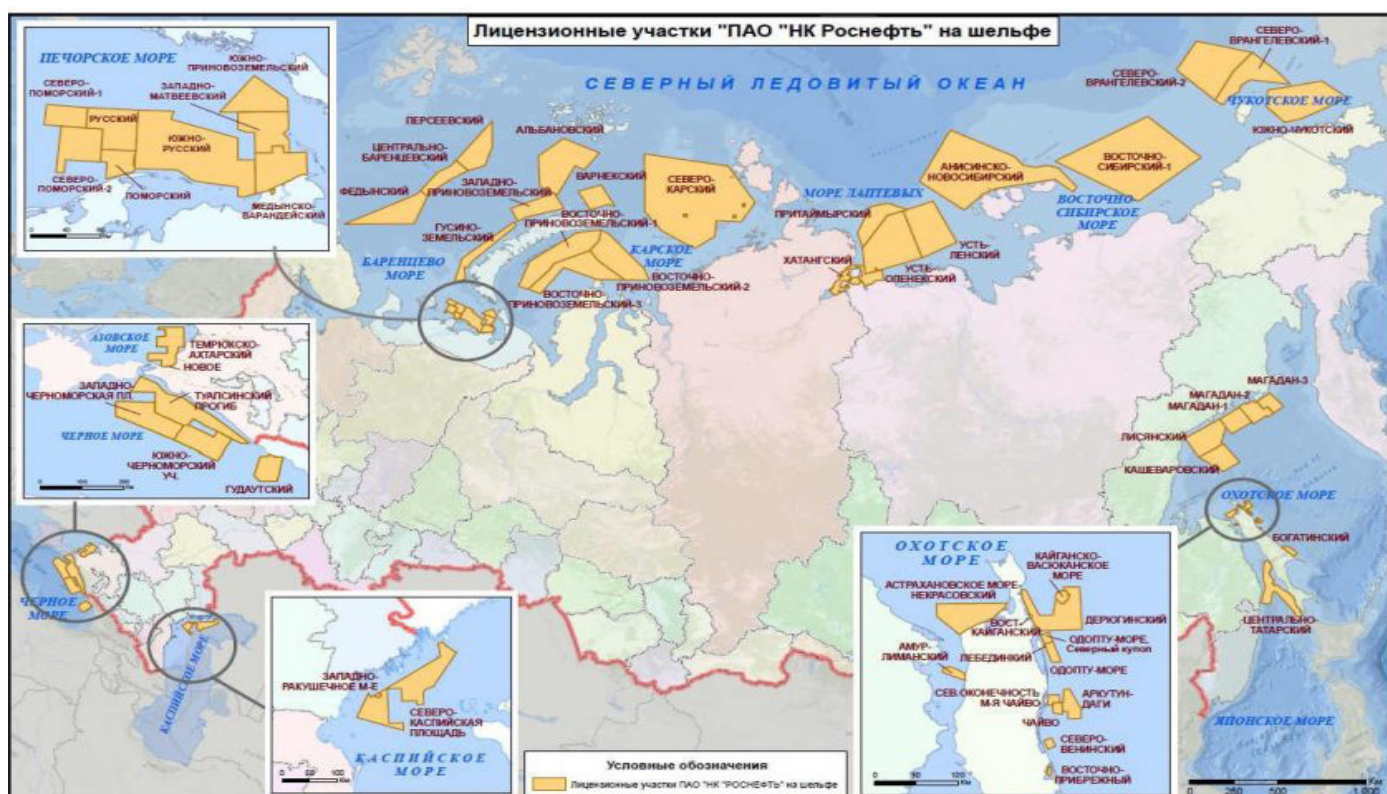


Рисунок 2 – Карта лицензионных участков «ПАО «НК Роснефть» на шельфе морей [1].

Целью написания настоящей статьи является анализ потребностей инфраструктуры СМП и предложение по использованию атомных станций малой мощности (АСММ) для локальных систем энергоснабжения береговых потребителей, а также описание мобильного модульного комплекса жизнеобеспечения арктических объектов.

Атомные ледоколы для СМП

Освоение СМП без ледокольного флота нереально, и только атомные ледоколы могут обеспечить круглогодичную проводку судов, особенно в восточной зоне Арктики. Первый атомный ледокол «Ленин» был построен в 1959 г., прослужил 30 лет с непрерывной эксплуатацией в течение одного года, после чего впервые в нем была осуществлена замена реакторной установки (РУ) на другую установку. Затем последовало строительство 6 ледоколов типа «Арктика» (второе поколение), которые отличались двухкорпусным исполнением, между корпусами которых располагались цистерны для водобалластировки, с автономностью до 8 месяцев. Были реализованы два типа судов: «Россия» с двумя РУ, мощностью 75 тыс. л.с.; «Таймыр» и «Вайгач» с 1 РУ, мощностью 40 тыс. л.с., которые имели меньшую осадку для прохода через устья рек.

В 90-х годах прошлого века как Военно-морской флот (ВМФ), так и ледокольный флот претерпели большой урон. Из 243 атомных подводных лодок (АПЛ) к началу века осталось 50 АПЛ, а 185 были выведены из состава ВМФ. 3 ледокола были выведены из эксплуатации в связи с сокращением северного завоза.

В настоящее время ФГУП «Росатомфлот» располагает семью атомными судами и осуществляет следующие задачи: северный завоз; освоение новых проектов в интересах Минобороны, ГК Росатом в части Павловского месторождения, проектов нефтегазовых и угольных компаний по проводке их судов.

Для реализации указанных задач по проекту 22220 строятся ледоколы ЛК-60 типа «Арктика» («Урал», «Сибирь») (третье поколение) мощностью 60 МВт, водоизмещением 33,5 тыс. т с системами электро-

движения (СЭД), преодолевающие льды толщиной до 3 м. Следующее четвертое поколение будет реализовано на основе ледокола типа «Лидер». Технические характеристики ледокола «Лидер», (проект 10510) по данным центрального конструкторского бюро (ЦКБ) «Айсберг»: водоизмещение – 71380 т, длина – 209 м, ширина – 47,7 м, осадка – 13 м, РУ – РИТМ 400 тепловой мощностью – 315 МВт, мощность на винтах – 120 МВт, автономность (по провизии 8 месяцев), ледопроездимость – 4,3 м на скорости 2 узла, 2,0 м на скорости 15 узлов. Концепция «открытой кормы» для подобных судов разных классов позволяет разместить на корме легкоъемные боевые модули разных типов. К 2035 году предусматривается использование 8 атомных ледоколов 4 поколения и свыше 100 танкеров и газозавозов водоизмещением до 100 тыс. т. [1].

Реакторные установки малой мощности

По терминологии Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) РУ мощностью до 300 МВт относятся к типу малой мощности, которые классифицируются как АСММ. В тоже время по типу нагрузок малыми считаются нагрузки до 30 МВт. Мировой интерес к АСММ обусловлен потребностями большинства стран в источниках малой мощности для выработки электричества, тепла и холода, опреснения воды на основе технологических решений без выброса диоксидов углерода, с быстрым вводом в эксплуатацию (1 год вместо 5 лет как для крупных атомных электростанций (АЭС) [4].

Большие массогабаритные показатели ранее разработанных в ГК Росатом сухопутных РУ были преодолены на судовых и подводных РУ. С 1959 по 2018 гг. преимущественно в ОКБМ Африкантова были разработаны 4 поколения РУ. 3 поколение на базе РУ КЛТ-40М и ОК-900А соответственно тепловой мощностью 135 и 170 МВт имели срок службы 25 лет, непрерывной работы – 8 тыс. час. 4 поколение РУ РИТМ-200 с мощностью блоков по 175 МВт должно иметь срок службы 40 лет, непрерывной работы – 26 тыс. час [4].

НИКИЭТ разработал РУ Шельф тепловой мощностью 6,4 МВт, непрерывной работой 5 тыс. час. в наземном и подводном варианте с ориентировочной стоимостью 10 руб./кВтч.

ОКБМ Африкантова и ЦКБ Рубин еще до перестройки разработали подводный энергокомплекс РУ Айсберг тепловой мощностью 24 МВт, непрерывной работой 8 тыс. час. с подводными буровыми, сейсморазведкой, охраной и др. модулями.

«Инжиниринговая компания инновационных проектов ИКИП» разработала АСММ мощностью от 0,1 до 1 МВт для обеспечения буровых станций связью, бытовыми условиями и др. нуждами [2].

Частно-государственная компания «АКМЭ-Инжиниринг» разработала и строит АСММ со свинцово-висмутовым теплоносителем на быстрых нейтронах СВБР-100 и СВБР-10, предназначенные для гражданского применения и для нужд Арктики, потенциальный объем мирового рынка которого оцениваются в 600 млрд. долл.

Промышленное производство СПГ и морские терминалы погрузки СПГ также возможно питать АСММ надводного и подводного базирования. В результате, для энергообеспечения Арктики, уже сегодня можно использовать более

20 типов АСММ мощностью 0,1; 1; 10; 30 МВт, т.е. весь диапазон малой генерации и малых нагрузок, характерных для Арктики (в связи с малочисленностью населения).

На (рис. 3) приведен схематический чертеж АСММ «УниTERM» разработки НИКИЭТ, которая может быть применена в вариантах морского, подводного и сухопутного базирования [4].

Предполагается, что РУ 4 поколения на быстрых нейтронах типа СВБР-100 и СВБР-10 с использованием МОКС топлива смогут закрыть проблему АСММ различного назначения и, несмотря на большую стоимость сравнительно с водо-водяными РУ, стать базовыми за счёт их широкого тиражирования, безопасности эксплуатации и удешевления топлива за счёт работы по замкнутому циклу. На (рис. 4) приведён схематический чертёж реакторного моноблока СВБР-100 разработки «АКМЭ-Инжиниринг».

Характеристики СВБР-100 приведены в (табл.1) [5].

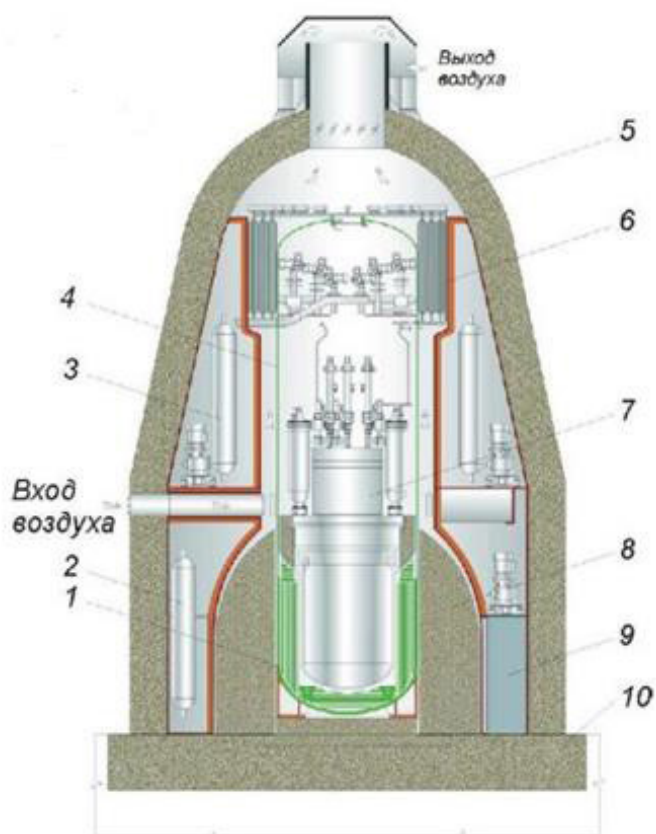


Рисунок 3 – Схематический чертеж АСММ «УниTERM» разработки НИКИЭТ, где
 1- Бак железобетонной защиты
 2- Баллоны хранения газообразных радиоактивных отходов
 3- Система подачи жидкого поглотителя
 4- Защитная оболочка
 5- Оболочка противударной защиты
 6- Теплообменник системы расхолаживания
 7- Парогенерирующий агрегат
 8- Блоки радиационной защиты
 9- Хранилище жидких и твердых радиоактивных отходов
 10- Фундамент

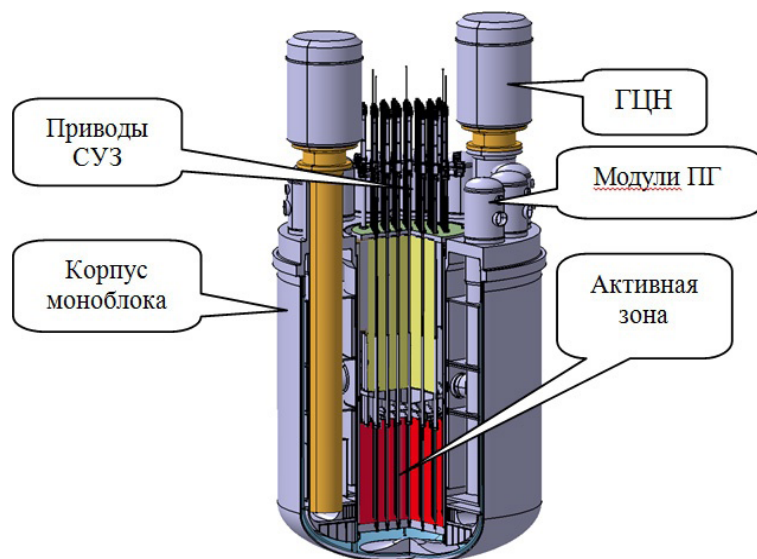


Рисунок 4 – Реакторный моноблок СВБР-100 [5], где

ГЦН – главный циркуляционный насос,
ПГ – парогенератор,
СУЗ – система управления и защиты

Таблица 1

Характеристика	Единица измерения	Значение
Мощность РУ тепловая	МВт	280
Мощность электрическая	МВт	100
Давление генерируемого насыщенного пара	МПа	7,0
Паропроизводительность	т/ч	580
Теплоноситель 1 контура состав 44,5% Pb + 55,5% Bi:		
Температура теплоносителя 1 контура, вх/вых	°С	340 / 490
Кампания активной зоны	тыс. эфф.ч	50
Топливо: тип		
среднее обогащение по U-235	%	20
максимальное обогащение по U-235 по UO ₂	%	16,3
Интервал времени между перегрузками	лет (одномоментная перегрузка всего топлива)	7 – 8
Габариты МБР (диаметр/высота)	м	4,53 / 7,86

Электрические суда и их энергетика

Судовые электроустановки обладают высоким коэффициентом полезного действия (КПД), обеспечивают гибкость и повышенную надежность и, что еще более важно, снижают стоимость оборудования. Простота схмотехники, сокращение числа первичных источников энергии, интеграция, гибкость проектных решений и убедительные коммерческие преимущества делают их перспективными для решения предъявленных кораблестроителями требований.

Системы судовых ходовых электроустановок по данным [6] разделяются на три основных направления, а именно:

- гибридные,
- интегрированные (IEP),
- полностью интегрированные (IFEP).
- гибридные установки – это корабельные установки, сходные с фрегатом серии Т23, где применение механического привода сочетается с электрическим приводом;

- IEP-установки, где традиционные источники энергии, используемые на корабле, заменяются на чисто электрические источники. В качестве примера можно привести эсминец серии Т45, танкеры серии АО и десантные корабли LPD(R);
- IFEP-установки, где концепция электрических источников энергии развивается дальше путем применения силовой электроники и элементов накопления электроэнергии, что дает дополнительные преимущества по стоимости и оперативным характеристикам;

В настоящее время термины электрокорабль и военный электрокорабль обозначают отдельные категории:

- электрокорабль – объединяет в себе усовершенствованные первичные источники энергии и развитую систему электрификации, встроенную в архитектуру IFEP;
- военный электрокорабль - электрокорабль, в котором системы наведения и мощное вооружение объединены в единое целое для ис-

пользования всех возможностей мощных систем энергоснабжения [7,8, 9].

На (рис. 5) приведена структурная схема энергоснабжения корабля среднего класса типа эсминца или ледокола. Силовая установка (СУ) содержит 2 ГТУ каждый мощностью 36 МВт (для эсминца Zumwalt) или по 27 МВт для отечественного судна, два дизель-генератора каждый мощностью по 6 МВт, одна-две батареи накопителей энергии НЭЭ в виде конденсаторов, суперконденсаторов и аккумуляторных батарей АБ. Источники в виде синхронных генераторов Г с постоянными магнитами (возможны и сверхпроводящие двигатель-генераторы) через выпрямители В нагружены на униполярную или биполярную сеть постоянного тока высокого напряжения ВН – 6(10) кВ и могут работать с самой высокой частотой вращения. Система автоматического управления комплекса (САУК) осуществляет управление и мониторинг агрегатов по шине САУК.

Цепи собственных нужд информационно-вычислительного комплекса могут содержать секционированную шину низкого напряжения НН – 0,22-0,4 кВ.

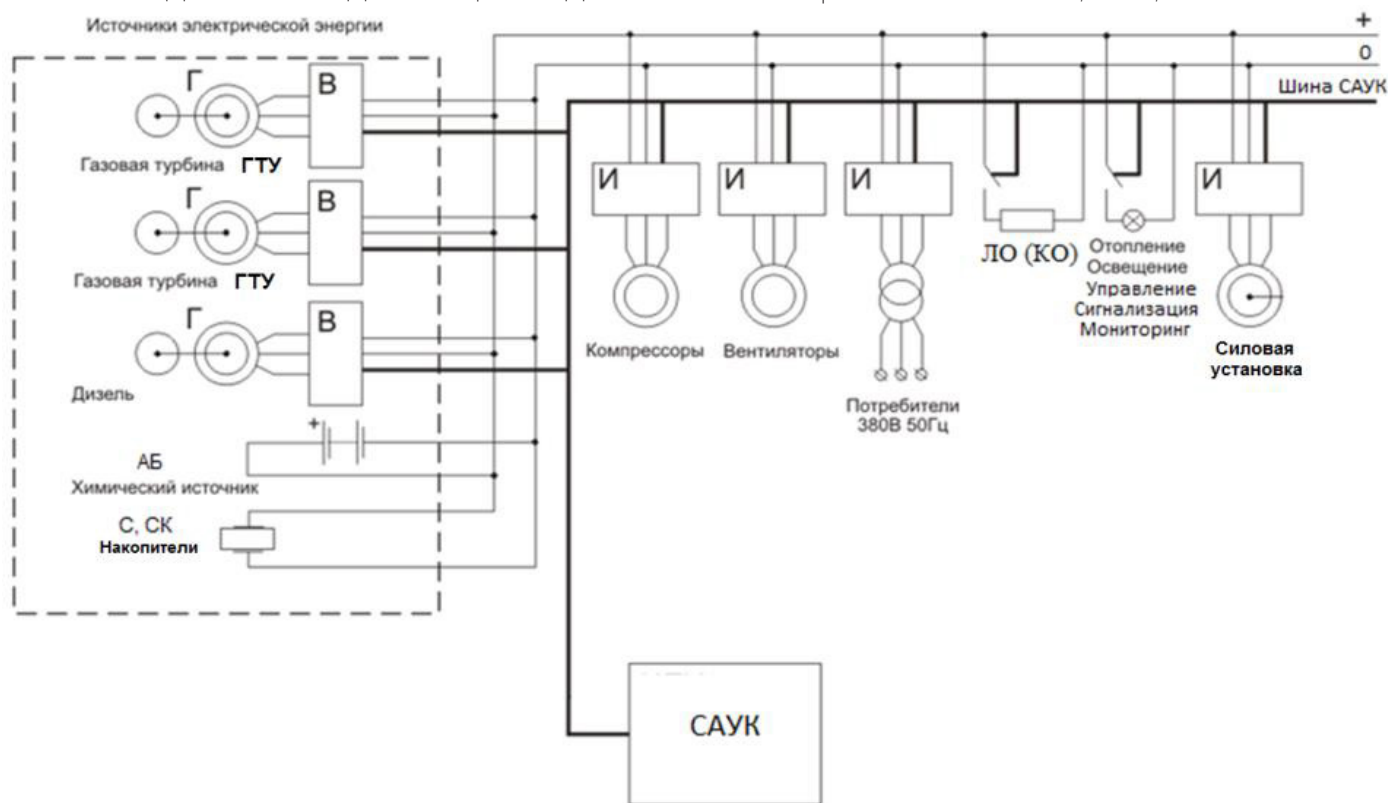


Рисунок 5 – Структурная схема энергоснабжения корабля, где принимаются обозначения: ГТУ-газотурбинная установка, В-выпрямитель, И-инвертор, АБ-аккумуляторная батарея, С, СК-конденсаторы, суперконденсаторы, ЛО (КО)-лазерное (кинетическое оружие), САУК- система автоматического управления комплекса [9]

Питание приводов и различных видов оружия осуществляется от шины ВН. Мощность накопителей электроэнергии (НЭЭ) и аккумуляторных батарей (АБ) выбирается как из условия резервирования СУ, так и с учетом энерговооруженности корабля. Автономность кораблей с ГТУ ограничена запасами топлива, в отличие от ледоколов СМП, где вместо газотурбинных установок (ГТУ) устанавливаются одна или две АСММ с турбогенератором и перегрузкой по топливу через 8 лет. НЭЭ позволяют кораблям осуществить форсировку движения, обеспечивают резервирование по мощности, а для ледоколов – продвижение на лед.

Автономные локальные системы энергоснабжения могут применяться для надводного, подводного и наземного базирования, при этом мощность единичного модуля электропитания составляет 6 МВт при напряжении 6 кВ. Ниже приведены характеристики газотурбинного агрегата ГТА-6/8 РМ производства НПО «Сатурн» (г. Рыбинск) на базе авиационного двигателя Д30КУ/КП (табл.2) [1]. Указанные агрегаты имеют суммарную наработку 55 млн. час. при питании от газа или керосина.

В качестве источника корабельной ГТУ может использоваться ГТУ мощностью 27 МВт, электрической мощностью 12,65 МВт,

Таблица 2

Характеристика	Единица измерения	Значение
Мощность на выходном валу	МВт	6,5
Мощность электрическая	МВт	6
Мощность тепловая	Гкал/час	12,2
КПД (ISO 2314)	%	25,7
Частота вращения	об/мин	3000
Расход дизельного топлива	кг/час	2263
Расход топливного газа	кг/час	1950
Температура газа за турбиной	°С	460
Расход газа на выходе	кг/с	47,3
Габариты (L x B x H)	м	3,4 x 2,3 x 2,5
Масса с рамой	т	5,62

КПД 28,5%, коэффициентом давления 10,5, расходом выхлопа 124 кг/с, температурой выхлопа 487 °С, частотой вращения 5000 об/мин, весом 87 т, габаритами 11,6 x 3,2 x 3,7 м. Назначенный ресурс ГТУ составляет 120 тыс. часов, срок службы 20 лет. Удельная мощность авиационных газовых турбин составляет выше 1000 Вт/кг, корабельных - в 3 раза ниже, а дизель-генераторов - примерно в 5-7 раз ниже.

В качестве источника ледакольной энергоустановки для питания береговых потребителей с помощью плавучего или подводного энергоблока могут использоваться РУ СВБР-100, РИТМ-200. Для Арктики и СМП применение АСММ с шиной постоянного тока и наличием накопителей является безальтернативным решением в части автономии, снижения выброса диоксидов углерода, отсутствием обслуживания и дистанционным цифровым управлением.

Номинальная мощность АБ определяется резервированием энергоснабжения и форсировкой приводов собственных нужд и электродвижения, причем, в качестве основных типов АБ предполагается использование литиевых батарей для мобильных комплексов. Литиевые элементы самые легкие, имеют номинальное напряжение 3,6 В, удельную энергоёмкость 240 Вт.ч/кг, число циклов заряд-разряд 600, диапазон температур $-20 \div +60$ °С. Для стационарных установок, по-прежнему, целесообразно применять никель-кадмиевые батареи. Никель-кадмиевые элементы имеют номинальное напряжение 1,35 В, удельную энергоёмкость 45-60 Вт.ч/кг, число циклов заряд-разряд 1000-1500, диапазон температур $-50 \div +40$ °С, срок службы 20-25 лет и их можно хранить про запас.

В качестве НЭЭ целесообразно использовать металло-пленочные импульсные конденсаторы КПИМ и ИКЧ с высокой удельной энергией - до 0,3 Дж/ч, собственной индуктивностью - примерно 10 нГн и внутренним сопротивлением 10 мОм [3]. Указанные конденсаторы разработаны на напряжение 5-100 кВ с максимальным током 100-300 кА с числом циклом 60-120 тыс. Наряду с конденсаторами возможно применение суперконденсато-

ров (СК), которые накапливают энергию в двойном электрическом слое на поверхности высокопористой наноструктуры. СК имеют емкости от 10 до 12000 Ф рабочим напряжением 1-15 В. Наиболее распространёнными являются полимерные СК с напряжением 2,5-2,7 В, импульсным током 30 А, ёмкостью до 2600 Ф, диапазоном температур $-30 \div +75$ °С. Удельная энергоёмкость СК - до 10 кДж/кг, удельная мощность - 3 Вт/кг [10].

Структура и состав мобильного модульного комплекса жизнеобеспечения (ММКЖ).

Технические решения по использованию модульных комплексов освещены в [11], а экологические аспекты в [12]. На арктических объектах необходимо использовать кабельные линии (КЛ) взамен прокладки воздушных линий (ВЛ) не только в силу большей пропускной способности и надёжности, но в силу большей стойкости к техногенным, природным воздействиям, улучшению экологии в условиях таяния вечной мерзлоты и др. факторам. Особенно это относится к подводной или надводной реализации комплекса. Разработанный в ВЭИ-филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Москва проект «Мобильный модульный комплекс жизнеобеспечения» ММКЖ [13] позволяет обеспечить потребителей не только электричеством, но, и, теплом, холодом, водой, (по потребности - воздухом). Структурная схема ММКЖ приведена на (рис.6). Сдвоенными линиями показаны водяные и воздушные трубопроводы. Управляемый выпрямитель 4 присоединяется к выходу турбогенератора либо водородного энерго модуля топливного элемента (ТЭ).

Основными модулями ММКЖ являются управляемый выпрямитель 4 и модуль преобразования, накопления и распределения 2. На (рис. 7 и 8) соответственно приведены однолинейные принципиальные схемы модулей 4 и 2, причем модуль 4 встраивается в подводный или надводный энерго модуль 1, для передачи питания на модуль 2 биполярным силовым и оптическим кабелем 6.

На (рис.8) принимаются те же обозначения, что и на (рис.7), но 1- НЭЭ типа

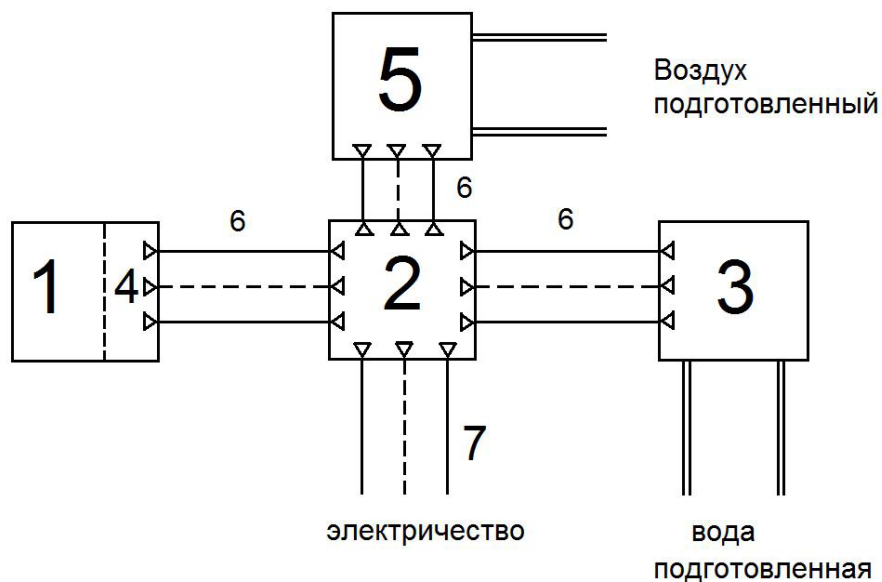


Рисунок 6 – Структурная схема ММКЖ [13], где
 1- атомный энергетический модуль с турбогенератором либо водородный энергомодуль на основе твердооксидных топливных элементов (ТЭ)
 2- модуль преобразования, накопления и распределения электроэнергии
 3- модуль водоподготовки
 4- управляемый выпрямитель
 5- модуль воздухоподготовки
 6- биполярный кабель постоянного тока
 7- трехфазный кабель переменного тока, либо биполярный кабель постоянного тока

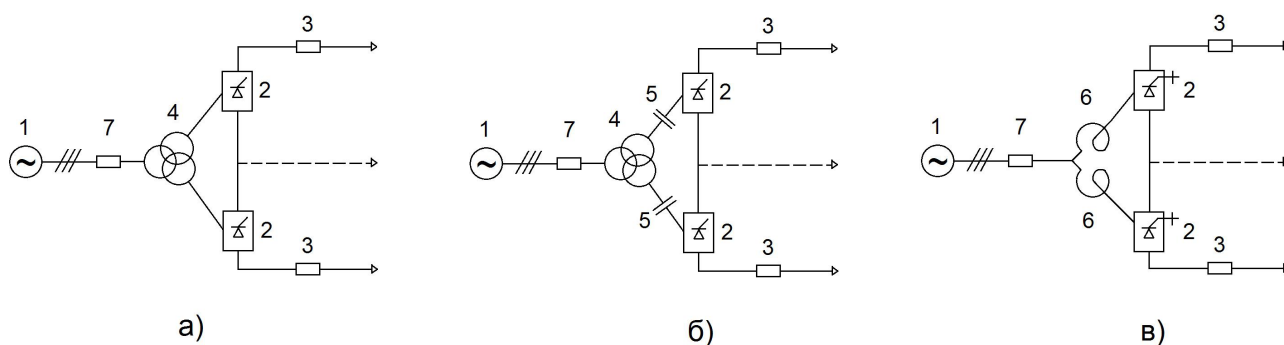


Рисунок 7 – Однолинейная принципиальная схема управляемого выпрямителя 4 (см. рис.6) [13], где

- 1- генератор атомного или водородного энергомодуля,
- 2- преобразователь тока на тиристорах (либо преобразователь напряжения на приборах IGBT или IGCT),
- 3- однополюсный выключатель постоянного тока,
- 4- трансформатор,
- 5- конденсатор,
- 6- реактор,
- 7- трехполюсный выключатель переменного тока

ТЭ или аккумуляторная батарея АБ, а 8-технологический модуль водоподготовки или воздухоподготовки, либо другой по необходимости.

На (рис.8) приведена однолинейная принципиальная схема модуля преобразования, накопления и распределения 2, указанного на (рис.6).

На (рис.7, схема а) соответствуют некомпенсированному преобразователю тока (ПТ), которая наиболее употребима для работы с синхронным генератором 1; схема б) соответствует компенсиро-

ванному преобразователю тока (КПТ) и приспособлена для работы с генератором 1 на постоянных магнитах, с целью регулирования напряжения за счет преобразователя напряжения (ПН) на шинах генератора; схема в) соответствует ПН и позволяет работать с любым типом генератора 1. Наличие трансформатора позволяет осуществить гальваническую развязку и согласовать по напряжению генератор и преобразователь. Применение ПН позволяет отказаться от трансформатора, но примерно на 30 % дороже ПТ.

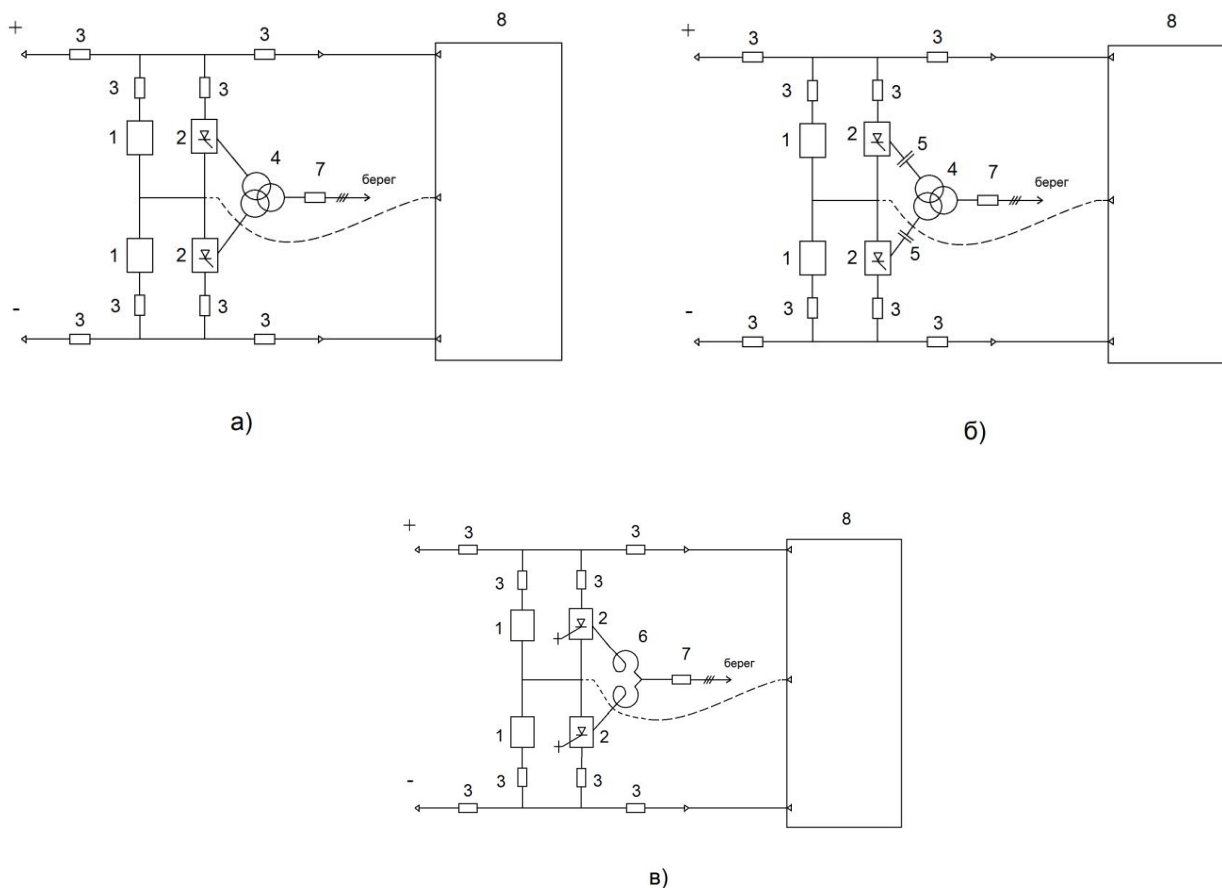


Рисунок 8 – Однолинейная принципиальная схема модуля преобразования, накопления и распределения 2, указанного на (рис.6) [13].

Схемы (рис. 8) аналогичны (рис.7), но работают в инверторном режиме с большим потреблением реактивной мощности и отличаются желательной установкой накопителей 1 вместо генераторов 1 на (рис.7). Если потребители на берегу используют переменный ток (например, при модернизации электроснабжения), то применяются схемы (рис.8). Если система электроснабжения создается вновь, то береговые потребители могут получать постоянный ток непосредственно от шин накопителей 1 при отказе от инверторов 2, показанных на (рис.8). При наличии возобновляемых источников энергии (ВИЭ) они могут подключаться к шинам накопителей 1 непосредственно через выключатели постоянного тока 3.

Подводный биполярный кабель 6, который соединяет подводный энергомодуль 1 (с модулем 4) и береговой модуль 2 (см. рис. 6) может быть как двухпроводным с возвратом тока по морю, так и иметь третий провод (показан пунктиром), который существенно повышает надежность энергоснабжения и обеспечивает безо-

пасность подводных обитателей. Наличие биполярного подводного кабеля постоянного тока 6 на выходе выпрямителя 4 позволяет минимизировать емкость конденсаторов на выходе выпрямителя и повысить надежность электроснабжения при аварии одного полюса выпрямителя или кабеля.

Работа мобильного модульного комплекса жизнеобеспечения

Мобильный модульный комплекс (ММКЖ) работает следующим образом. При доставке комплекса буксиром к месту дислокации (в составе трех-четырех модулей) осуществляется следующее размещение (см. рис.6): модуль 1(4) – на достаточной глубине от промерзания и волнения моря, либо наплаву – на якорях; модули 2,3,5 и др. – на берегу (вдали от линии прибоя и приливов). Затем, на случай дрейфа, с помощью буксира прокладываются подводные кабельные линии постоянного тока 6 между модулями 1 и 2 (см. рис.6). Модули 2,3,5 и выход к береговым потребителям связывают назем-

ными кабельными линиями постоянного тока. После монтажа комплекса осуществляют запуск атомного реактора, либо водородного энерго модуля и вспомогательных устройств; подключение нагрузок; проводят автономные испытания модулей, пробный пуск и проверки комплекса. Нагрузки изменяют ступенями с выдержкой времени и фиксацией в протоколах испытаний. Модуль водоподготовки 3 в связи с большим электропотреблением подключают в последнюю очередь, причем возможна одновременная работа модулей 3 и 5: модуль 5 – днем, модуль 3 – ночью. Аналогично присоединение ВИЭ, например, солнечных батарей, ветровых генераторов и т.п., может происходить по мере необходимости: заряд НЭЭ в модуле 2 – ночью, разряд НЭЭ – днем в пике потребления.

В установленном режиме турбогенератор модуля 1 вырабатывает трёхфазный переменный ток, который выпрямляется управляемым полупроводниковым выпрямителем и по подводным кабельным линиям постоянного тока передается на берег к модулю 2. Модуль 2 передает электричество постоянным током береговым потребителям и, при необходимости, – на модуль 3 для водоподготовки и модуль 5 для воздухоподготовки. Модуль 3 осуществляет забор морской воды через прибрежные трубопроводы, осуществляет водоподготовку и накопление приготовленной воды, в береговых балластных цистернах, включая контроль количества и качества питьевой воды исходя из предполагаемых потребностей. Перед окончанием расхода топлива в модуле 1 и приходом другого заправленного модуля 1, осуществляется полная зарядка НЭЭ в модуле 2, а также присоединение ВИЭ для питания потребителей на время замены модуля 1. Отработавший модуль 1 с помощью буксира доставляется на централизованный пункт заправки топлива.

В нормальных режимах значение передаваемой мощности от модуля 1 задается уставкой мощности от берегового диспетчерского пункта, которая по телеканалу (оптоволокну) передается на модуль 2 и на модуль 1 с разделением этой уставки на две составляющие, с приоритетом в ча-

сти стабилизации предшествующего режима модуля 1. Изменение уставки мощности и режима модуля 1 сопровождается плавным изменением углов управления выпрямителя 4, который с помощью своего регулятора тока изменяет ток в подводном биполярном кабеле в сторону заданной уставки, одновременно изменяя уставку тока регулятора заряда или разряда накопителя модуля 2. Ток биполярного кабеля при симметрии напряжений полюсов выпрямителя модуля 4 в нейтральном кабеле, соединяющем средние точки выпрямителя 4 и модуля 2 отсутствует. При возникновении аварии в одном из полюсов подводного кабеля аварийный полюс мгновенно отключается с помощью его выключателей постоянного тока 3 (рис. 7,8), а уставка тока в регуляторе неповрежденного полюса выпрямителя 4 повышается вдвое, компенсируя снижение вдвое потока активной мощности для потребителей. При этом ток из неповрежденного полюса переходит в нейтральный кабель или при его отсутствии кратковременно протекает по морю. Наличие автоматики перевода в инверторный режим ПИР в управляемом выпрямителе 4 позволяет осуществить отключение поврежденного полюса даже при замене выключателей 3 на разъединители путем их отключения в бестоковую паузу, что сопровождалось бы кратковременным перерывом энергоснабжения потребителей при отсутствии накопителей. Наличие этих накопителей смягчает условия протекания рассматриваемого предельного аварийного режима. Восстановление исходного нормального режима сопровождается предварительным замыканием отключенных выключателей 3 с последующим плавным изменением углов управления аварийного полюса выпрямителя 4 и снижением уставки регулятора тока неповрежденного полюса до исходного значения.

Выводы

Рассмотренные характеристики СМП, атомных ледоколов и их судовой энергетики показывают целесообразность энергоснабжения береговых потребителей с использованием судовых РУ типа АСММ,

что позволяет унифицировать и тиражировать энергоустановки.

Для Арктики и СМП применение АСММ с шиной постоянного тока и наличием накопителей является безальтернативным решением в части автономии, снижения выброса диоксидов углерода и азота, отсутствием обслуживания и дистанционным цифровым управлением.

Рассмотренные альтернативные варианты энергообеспечения стационарных и мобильных установок наземного, надводного и подводного базирования на СПГ предусматривают использование авиационных газовых турбин мощностью до 5 МВт, а для установок морского базирования - корабельных газовых турбин мощностью от 30 МВт с применением накопителей электроэнергии, мощность которых зависит от пиковой мощности потребителей.

Описана структура и состав ММКЖ в составе подводного или надводного энерго модуля с управляемым выпрямителем, выход которого соединен биполярным подводным кабелем постоянного тока с береговыми модулями преобразования, накопления и распределения. Выходы последнего наземными биполярными кабелями связаны со входами модулей водоподготовки и воздухоподготовки, а также производственными и вспомогательными модулями. Комплекс напряжением от 1 до 10 кВ мощностью от 1 до 10 МВт создается с использованием преобразователей тока и напряжения, накопителей электроэнергии, выключателей и кабелей постоянного тока, оснащается цифровыми устройствами управления.

Список литературы:

1. Шульга Р.Н., Петров А.Ю., Завидей В.И. Судовая атомная энергетика, как основа построения автономных систем энергоснабжения при освоении арктических территорий// Энергетика. 2019 2(69) С. 93-97
2. Почему Россия и Беларусь должны делать малые АЭС вместе, Малая энергетика для Арктики, СОНАР 2050
3. Марцинкевич Б. Мегапроекты в Арктике без прямого участия государства невозможны, <https://www.geoenergetics.ru>, 04.10.2017
4. Саркисов А.А. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетике: Т. 2 М: Академ-Принт, 2015. 387 с.
5. Комлев О. Г., Тошинский Г. И., Тормышев И. В. СВБР-100: Потенциальная энергия теплоносителя и безопасность АЭС// Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2012. №7.
6. G.T. Little, S.S. Yong, J. M. Newell, Военно-морской корабль 7 поколения//пер. и ред. Местергази В. А. ВЭИ-Принт. 2017
7. Боровиков П. В., Шульга Р. Н. Энергообеспечение нетрадиционных направленных видов наступательного оружия//изд. РАН// 2017
8. Коул Дж. М. Пять видов оружия будущего, которое может изменить характер войны// The National Interest (дата обращения 16.02.2014)
9. Лазерное оружие – реалии настоящего времени. URL: www.arms-expo.ru (дата обращения 02.09.2009)
10. Каталог ООО «Русская технологическая группа 2». URL: <http://www.rustechgroup.ru/rus/index.htm> 2012. (дата обращения 02.09.2009)
11. Шульга Р. Н., Путилова И. В. Мультиагентные системы постоянного тока с использованием ВИЭ и водородных топливных элементов// Альтернативная электроэнергетика и экология. (ISJAEЕ). 2019. 04-06. С. 65-82.
12. Шульга Р. Н., Путилова И. В., Петров А. Ю. Арктика: экология и водородная электроэнергетика// Альтернативная электроэнергетика и экология.(ISJAEЕ). 2019. 07-09. С.43-62.
13. Шульга Р. Н., Стальков П. М., Кокуркин М. П., Лавринович В. А. Мобильный модульный комплекс жизнеобеспечения. Заявка в Роспатент №2019101084 от10.01.2019

References:

1. Shulga R. N., Petrov A. Yu., Zaviday V. I. Ship nuclear power engineering as a basis for building astronomical power supply systems in the development of Arctic territories.// Energetika. 2019 2(69) 93-97s.
2. Pochemu Rossiya i Belarus' dolzhny delat' malye AES vmeste, Malaya energetika dlya Arktiki, SONAR 2050 (In Russian)
3. Marcinkevich B. Megaproekty v Arktike bez pryamogo uchastiya gosudarstva nevozmozhny, <https://www.geoenergetics.ru>, 04.10.2017 (In Russian)
4. Sarkisov A.A. Atomnye stancii maloj moshchnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki: T. 2 M:

- Akadem-Print, 2015. 387 s. (In Russian)
5. Komlev O. G., Toshinskij G. I., Tormyshev I. V. SVBR-100: Potencial'naya energiya teplonositelya i bezopasnost' AES// Bezopasnost' yadernyh tekhnologij i okruzhayushchej sredy. 2012. №1. (In Russian)
 6. G.T. Little, S.S. Yong, J. M. Newell, Voennno-morskoj korabl' 7 pokoleniya//per. i red. Mestergazi V. A. VEI-Print. 2017 (In Russian)
 7. Borovikov P. V., SHul'ga R. N. Energoobespechenie netradicionnyh napravlennyh vidov nastupatel'nogo oruzhiya//izd. RARAN// 2017 (In Russian)
 8. Koul Dzh. M. Pyat' vidov oruzhiya budushchego, kotoroe mozhet izmenit' harakter vojny// The National Interest (data obrashcheniya 16.02.2014) (In Russian)
 9. Lazernoe oruzhie – realii nastoyashchego vremeni. URL: www.arms-expo.ru (data obrashcheniya 02.09.2009) (In Russian)
 10. Katalog OOO «Russkaya tekhnologicheskaya gruppa 2». URL: <http://www.rustechgroup.ru/rus/index.htm> 2012. (data obrashcheniya 02.09.2009) (In Russian)
 11. SHul'ga R. N., Putilova I. V. Mul'tiagentnye sistemy postoyannogo toka s ispol'zovaniem VIE i vodorodnyh toplivnyh elementov// Al'ternativnaya elektroenergetika i ekologiya. (ISJAE). 2019. 04-06. S. 65-82. (In Russian)
 12. SHul'ga R. N., Putilova I. V., Petrov A. YU. Arktika: ekologiya i vodorodnaya elektroenergetika// Al'ternativnaya elektroenergetika i ekologiya. (ISJAE). 2019. 07-09. S.43-62. (In Russian)
 13. SHul'ga R. N., Stal'kov P. M., Kokurkin M. P., Lavrinovich V. A. Mobil'nyj modul'nyj kompleks zhizneobespecheniya. Zayavka v Rospatent №2019101084 ot10.01.2019. (In Russian)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ

К.А. Змиева

Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образование «Московский государственный технологический Университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

✉ kirazmieva@mail.ru

В статье приведено описание качественных и количественных взаимосвязей между энергетическими характеристиками силовых выпрямительных устройств технологического оборудования и параметрами технологических процессов, реализуемых на этом оборудовании. Показана необходимость оптимизации энергопотребления промышленных предприятий, расположенных в северных регионах.

Ключевые слова: постоянный ток, выпрямительное устройство, технологическое оборудование, промышленное предприятие, Арктика.

RESEARCH OF POWER CHARACTERISTICS OF POWER RECTIFIERS TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES OF THE NORTHERN REGIONS

K.A. Zmieva

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

The article describes the qualitative and quantitative relationships between the energy characteristics of power rectifiers of technological equipment and the parameters of technological processes implemented on this equipment. The necessity of optimizing the energy consumption of industrial enterprises located in the Northern regions is shown.

Keywords: direct current (DC), rectifier device, manufacturing equipment, industrial enterprise, Arctic.

Статья получена: 27.03.2020

Принята к публикации: 31.03.2020

Опубликована: 10.04.2020

Введение. Энергоэффективность промышленного предприятия в целом и отдельных технологических процессов в частности является одним из важнейших показателей качества как отдельного производства, так и отрасли в целом, и в значительной степени определяет его конкурентоспособность.

Сегодня мы наблюдаем небывалый за последние десятилетия индустриальный рост в северных арктических регионах России. Это связано, в первую очередь, с поставленной руководством страны задачей развития Северного морского пути и многократного повышения реализуемого по нему грузопотока, а с другой стороны, ростом объемов нефте- и газодобычи в этом регионе. Около 20% продуктов добывающих отраслей производятся сегодня в Арктике. Также, около 2% продукции обрабатывающих отраслей производится на территории рассматриваемого региона.

Большая часть всей продукции производится на территории Ямало-Ненецкого АО, а около 10% на севере Красноярского края и в Ненецком АО.

Почти 2% промышленных продуктов производятся именно в арктической части Якутии. В западной части отечественной Арктики находятся районы старого освоения — индустриализированные в начале 20 века. К примеру, наиболее диверсифицированной является именно Мурманская область со своей развитой горнодобывающей промышленностью, металлургией и электроэнергетикой.

Ключевыми предприятиями Арктики являются:

- Кольская горно-металлургическая компания («Норникель»),
- Кандалакшский алюминиевый завод (ОАО «РУСАЛ»),
- Оленегорский ГОК,
- Ковдорский ГОК,
- «Ковдорслюда»,
- ОАО «Апатит» и др.

Основные производимые продукты: цветные металлы, стройматериалы, флогопит, алюминий, апатитонефелиновые руды, вермикулит, комплексные железные руды, ферритовые стронциевые порошки, эгириновый, сфеновый,

титано-магнетитовый, железорудный, апатитовый и бадделеитовый концентраты и другие концентраты.

Наиболее крупные предприятия инфраструктуры:

- Кольская АЭС,
- ГЭС Мурманской области и др.

Число и номенклатура используемого в северных регионах технологического оборудования постоянно растет. В то же время, вопрос качественного и бесперебойного энергообеспечения Арктики является одним из ограничителей роста объема добычи и переработки полезных ископаемых в регионе. Расположенные здесь предприятия вынуждены использовать привозное органическое топливо, что в связи с высокой логистической составляющей стоимости и низкой надежностью выработавшего свой ресурс генерирующего оборудования приводит к значительному росту издержек и снижению экономических показателей. Присущие этим регионам природно-климатические условия делают затруднительным повсеместное внедрение альтернативных электрогенерирующих мощностей, основанных на преобразовании солнечной, ветровой или приливной энергии [1]. В связи с вышесказанным, задача рационального использования электроэнергии и применения энергоэффективных технологий является актуальной для промышленных предприятий, расположенных в северных регионах.

Одной из характерных особенностей современного промышленного производства является наличие в нем автоматизированного технологического оборудования различной номенклатуры.

Значительная часть этого оборудования уже спроектирована на электропитание от сети постоянного тока. Это, прежде всего, оборудование гальванических цехов, электросварки, электротермической обработки, покраски и прочее. И поэтому для работы в сети переменного тока такое оборудование оснащается специальными выпрямительными устройствами.

Выпрямительным устройством (ВУ) называется статическое устройство, обеспечивающее преобразование электрической энергии переменного тока

в электрическую энергию постоянного тока. В качестве источника энергии $u_1(t)$ в основном используется однофазная или трехфазная сеть переменного тока промышленной частоты 50 Гц. ВУ преобразует знакопеременное напряжение источника энергии $u_1(t)$ в напряжение постоянного тока $u_0(t)$, содержащее, кроме полезного продукта преобразования — постоянной составляющей напряжения U_0 , также переменную составляющую, называемую пульсацией $u_n(t) = u_0(t) - U_0$. Допустимый уровень пульсации на выходе ВУ и критерии (параметры) её оценки определяются требованиями технологического оборудования.

Выпрямительные устройства могут быть выполнены по традиционной схеме или по схеме с двойным преобразованием энергии. В состав такого ВУ входит низкочастотный силовой трансформатор Т, работающий на частоте $\Delta = 50$ Гц источника энергии, вентильный блок (диодный блок) ВБ и сглаживающий фильтр СФ.

Трансформатор обеспечивает преобразование уровня напряжения питающей сети (источника энергии) $u_1(t)$ до значений $u_2(t)$, при которых на выходе ВУ может быть получено требуемое значение постоянной составляющей напряжения U_0 . Кроме того, трансформатор необходим для обеспечения гальванической развязки между источником энергии и выходными зажимами ВУ, что позволяет заземлять один из выходных полюсов (зажимов) ВУ. ВБ преобразует переменное напряжение $u_2(t)$ в знакопостоянное (однополярное) напряжение $u_{01}(t)$. В простейшем случае ВБ представляет собой набор неуправляемых вентилях (диодов), собранных по той или другой схеме выпрямления. В стабилизированных ВУ, выполненных по традиционной схеме, ВБ может быть также реализован полностью на полууправляемых приборах — тиристорах или в его состав могут входить как диоды, так и тиристоры. ВУ, в которых ВБ реализован с применением тиристоров, называются чаще управляемыми выпрямителями. После ВБ практически в любом выпрямительном устройстве, предназначенном для электропитания аппаратуры телекоммуникаций, следует

сглаживающий фильтр СФ, представляющий собой фильтр нижних частот. СФ необходим для уменьшения уровня пульсации на выходе ВУ до значений, удовлетворяющих требованиям аппаратуры [3].

Другая же часть производственного оборудования на предприятиях, хотя и спроектирована на электропитание от сети переменного тока, но ее электротехническая система содержит в своем составе также выпрямительные устройства. К этому оборудованию относятся, в первую очередь, современные металлорежущие станки и комплексы.

Одной из основных особенностей технологических процессов, реализуемых на этом оборудовании, являются переменные нагрузки на его электротехнические системы в целом и его выпрямительные устройства в частности. Такие режимы эксплуатации выпрямительных устройств технологического оборудования являются причиной изменения их энергоэффективности и стабильности выпрямленного напряжения.

Все это требует вносить коррективы в работу выпрямительных устройств средствами автоматизации с учетом реальной нагрузки на них.

Цель исследования состоит в выявлении необходимости автоматизации и управления силовыми выпрямительными устройствами промышленного оборудования для повышения их энергоэффективности при переменных нагрузках.

Результаты исследования. Как следует из рис. 1, силовые выпрямительные устройства являются органической частью технологического процесса и их энергопотребление, а значит и влияние на энергоёмкость машиностроительных технологических процессов с учетом изменяющихся величин их мощностей, требует дополнительных исследований.

В этой связи следует также добавить, что пока применение частотно регулируемых приводов (ЧРП) в машиностроении было относительно невелико, вклад в энергопотребление предприятия этих приводов был невелик. Однако,

в настоящее время, по мере стремительного роста оборудования ЧРП их вклад, а значит и вклад выпрямителей частотных преобразователей, в энергопотребление существенно увеличивается [2].

Существует два класса силовых выпрямительных устройств: линейные регулируемые источники питания и импульсные источники питания. Для регулирования величины выходного напряжения в них используются принципиально разные методы. На рис. 2 изображена упрощённая схема *линейного регулируемого источника питания*.

В источнике питания этого типа низкочастотный (50 или 60 Гц) трансформатор используется для понижения переменного напряжения из электрической сети при неизменной частоте. В свою очередь, это вторичное напряжение выпрямляется и фильтруется. Регулирование

производится с помощью активного балласта, или переменного сопротивления, включаемого последовательно с нагрузкой. Обычно в качестве такого сопротивления используется биполярный или полевой транзистор в линейном режиме работы. Схема обратной связи, сравнивая величину выходного напряжения с величиной фиксированного опорного напряжения, устанавливает сопротивление балласта таким образом, чтобы поддерживать выходные параметры на заданном уровне. В таком режиме работы большое количество мощности рассеивается, переходя в теплоту, что приводит к снижению КПД. Из-за низкой эффективности работы источника приходится применять громоздкие радиаторы и охлаждающие вентиляторы. Линейные источники питания могут только понижать входное напряжение. Разница между входным и выходным

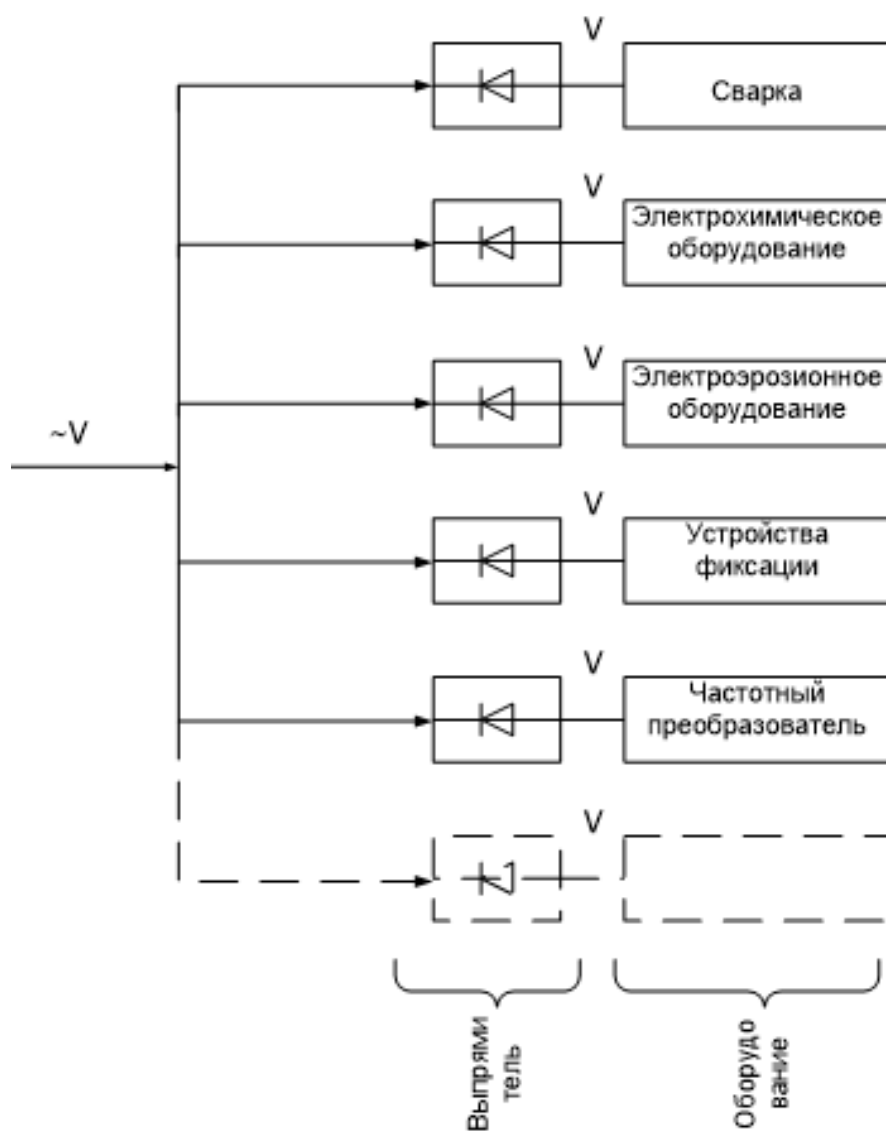


Рисунок 1 – Примеры использования выпрямительных устройств.

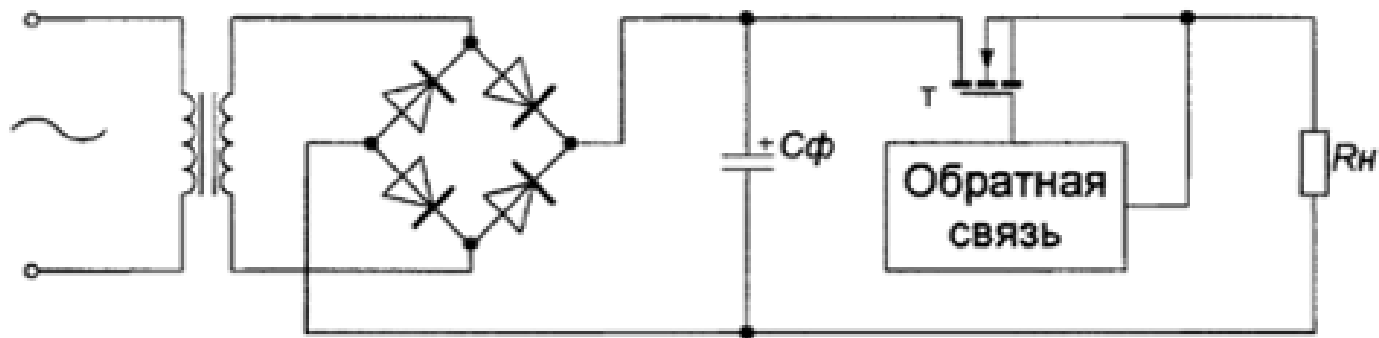


Рисунок 2 – Упрощенная схема линейного преобразователя.

напряжением равна падению напряжения на транзисторах $U_{\text{пад}}$. Следовательно, в стабилизирующей схеме происходит рассеяние мощности, равной произведению $U_{\text{пад}} I_{\text{наг}}$, где $I_{\text{наг}}$ - выходной ток, или ток нагрузки. Поскольку входной ток преобразователя равен $I_{\text{наг}}$, КПД такого преобразователя равно $U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$. Таким образом, в большинстве практических случаев КПД будет иметь недопустимо малое значение. Большие массогабаритные показатели, высокая стоимость и размеры радиатора приводят к тому, что линейные стабилизаторы в источниках питания редко применяются при мощностях свыше 10 Вт. Таким образом, этот тип источников питания может быть довольно громоздким, тяжёлым и практически не подходит для современных компактных электронных устройств.

Импульсный стабилизатор лишён большинства указанных недостатков линейного преобразователя.

Особенностью импульсных преобразователей является то, что выходное напряжение может быть выше или ниже входного, а также отличаться от него по знаку. Кроме того, поскольку входное напряжение преобразуется в импульсы и поступает на трансформатор, используя дополнительные обмотки, можно получить более одного выходного напряжения. Стоимость каждого дополнительного выхода очень мала по сравнению с полной стоимостью устройства.

К другим преимуществам относятся приемлемые размеры и стоимость при больших значениях выходной мощности. Так как частота в импульсном режиме работы гораздо больше 50 Гц, импульсные источники питания значительно (в десятки раз) превосходят линейные,

а их КПД составляет обычно от 85 до 98%. С одной стороны, уменьшение потерь достигается за счет применения современной элементной базы. Но, с другой стороны, более значительный эффект может быть достигнут благодаря использованию соответствующих, зачастую нестандартных схемотехнических решений и высокой степени оптимизации всех параметров преобразователя. В то же время, постоянное уменьшение размеров радиоэлектронных устройств, при одновременном росте потребляемой ими мощности, увеличение количества средств связи, внедрение новых энергоёмких технологических процессов в производстве привели к тому, что компактность и эффективность стали едва ли не основными требованиями к современным преобразователям энергии.

Одной из главных проблем при преобразовании переменного напряжения в постоянное является проблема стабилизации выходного напряжения. Для этих целей и линейные и импульсные источники питания оснащаются емкостными фильтрами. В конденсаторе фильтра:

$$U = \frac{1}{C} \int i dt + U_{\text{нач}} \quad (1)$$

Для ограничения колебаний напряжения необходимо или увеличивать емкость конденсатора фильтра C или снижать время прохождения сигнала через конденсатор dt . Одним из главных достоинств импульсных источников питания является возможность использования очень малых dt (за счет повышения частоты коммутации ключей), благодаря чему емкость конденсатора фильтра в таких преобразователях может быть существенно снижена.

Несомненным достоинством выпрямительных устройств импульсного типа является возможность преобразования электрической энергии практически любого вида. При работе от сети переменного тока входное переменное напряжение сначала выпрямляется, а затем преобразуется в емкостном фильтре, на выходе которого получаем постоянное напряжение, на фоне которого присутствуют пульсации. Следующим элементом преобразователя является высокочастотный силовой ключ. Он представляет собой полупроводниковое устройство, биполярный или полевой транзистор, который быстро открывается и закрывается, формируя импульсы напряжения, поступающие на первичную обмотку силового трансформатора.

Управляющие импульсы имеют фиксированную частоту, которая для современных преобразователей обычно лежит в диапазоне от 10 до 500 кГц, а их скважность регулируется системой управления, отвечающей за стабилизацию выходных параметров.

Таким образом, на вторичной обмотке трансформатора формируется последовательность импульсов напряжения требуемой амплитуды и длительности. После этого переменное напряжение в виде импульсов выпрямляется и сглаживается выходным фильтром, который представляет собой ёмкость или соединение ёмкостей и индуктивностей, в зависимости от типа схемы. Такое преобразование энергии происходит с наименьшими возможными потерями и обеспечивает максимальную эффективность работы источника.

Таким образом, сетевой импульсный источник питания в общем случае должен выполнять следующие функции с высокой эффективностью и малыми потерями:

1. Выпрямление — преобразование входного переменного напряжения сети в постоянное.
2. Входная фильтрация — сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения.
3. Трансформация и гальваническая развязка - получение напряжения нужной величины, гальванически развязанного относительно входных цепей.

4. Регулирование — поддержание постоянного уровня выходного напряжения независимо от изменений в сети, нагрузки и температуры.
5. Выпрямление и фильтрация выходная — преобразование переменного напряжения на выходе трансформатора в последовательность однополярных импульсов и выделение их постоянной составляющей.
6. Защита — предотвращение возникновения скачков напряжения на выходе, отключение при нарушении электроснабжения, превышении нагрузки или коротком замыкании.

Регулирование выходного напряжения происходит благодаря тому, что изменение скважности импульсов на выходе ключей вызывает соответствующее изменение постоянной составляющей напряжения на нагрузке.

В настоящее время существует большое количество схем построения импульсных источников питания, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки, что делает их применимыми для решения определённых классов задач [2,3].

Хорошо известны и описаны в литературе три базовые схемы импульсных выпрямительных устройств без гальванической развязки - понижающий, повышающий и инвертирующий преобразователи. Преобразование энергии в этих схемах производится при помощи индуктивностей и емкостей. Это наиболее простые устройства с минимальным количеством компонентов. На примере таких схем в полной мере могут быть исследованы закономерности работы и методы анализа более сложных типов преобразователей [4].

Структурная схема **понижающего импульсного преобразователя** изображена на рис. 3.

Для облегчения анализа работы данной схемы и остальных базовых схем преобразователей примем некоторые допущения. Будем считать, что все компоненты идеальны. Конденсатор имеет бесконечную емкость, поэтому можно пренебречь пульсациями выходного тока.

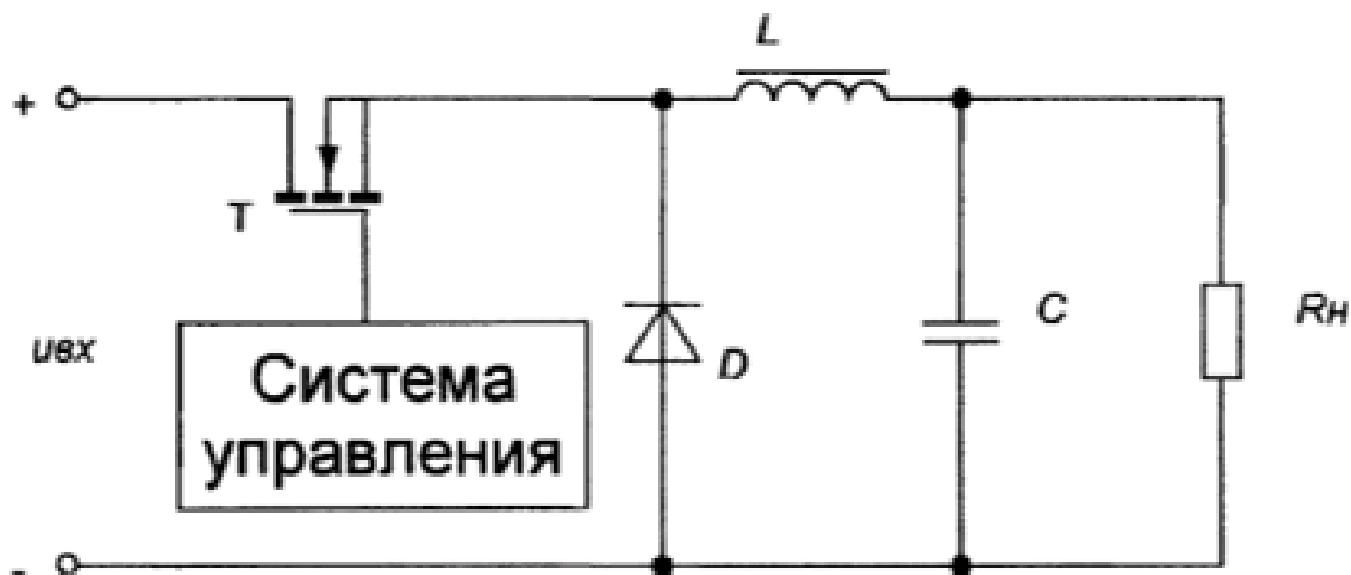


Рисунок 3 – Структурная схема понижающего импульсного преобразователя.

Данная схема, как и все импульсные регуляторы напряжения, рассматриваемые далее, работает либо в двух-, либо в трех-интервальном режиме. В первом случае имеют место следующие интервалы работы схемы за период:

1. Импульс (транзистор открыт, диод закрыт);
2. Пауза (транзистор закрыт, диод открыт).

Этот режим называют режимом непрерывного тока, так как ток через дроссель протекает постоянно.

Во втором случае ток прерывистый:

1. Импульс (транзистор открыт, диод закрыт);
2. Пауза (транзистор закрыт, диод открыт);
3. Отсечка (оба ключа закрыты).

Режим непрерывного тока является предпочтительным. Он обеспечивает снижение размеров дросселя и конденсатора. Ключи при этом также испытывают меньшие токовые нагрузки. Транзистор формирует импульсное напряжение, которое впоследствии сглаживается выходным фильтром.

Через открытый ключ происходит запасание магнитной энергии дросселем и входное напряжения через индуктивность L подается на выход преобразователя. Когда транзистор закрывается, ток индуктивности меняется на противоположный, открывается диод, через который запасенная

магнитная энергия передается в нагрузку.

Вычислим параметры выходного напряжения для данного преобразователя, для чего введем параметр

$$D = \frac{t_{\text{н}}}{T},$$

называемый коэффициентом заполнения импульсов, характеризующий управляющий сигнал.

Воспользуемся вторым законом Кирхгофа для постоянных значений напряжений. Рассмотрим контур: $U_{\text{вх}}, T, L, R_{\text{н}}$.

$$-U_{\text{вх}} + U_T + U_L + U_{\text{вых}} = 0 \quad (2)$$

Напряжение на транзисторе определим как среднее, используя временную диаграмму $u_{\text{кл}}$ (рис. 4):

$$U_T = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{кл}} dt = \frac{1}{T} \int_{t_u}^T U_{\text{вх}} dt = U_{\text{вх}}(1 - D), \quad (3)$$

откуда

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \quad (4)$$

Таким образом, выходное напряжение понижающего регулятора всегда ниже, чем входное, т.к. D никогда не достигнет единицы. Регулировка выходного напряжения осуществляется путем изменения D .

От понижающего преобразователя схема повышающего преобразователя без гальванической развязки отличается только порядком соединения элементов.

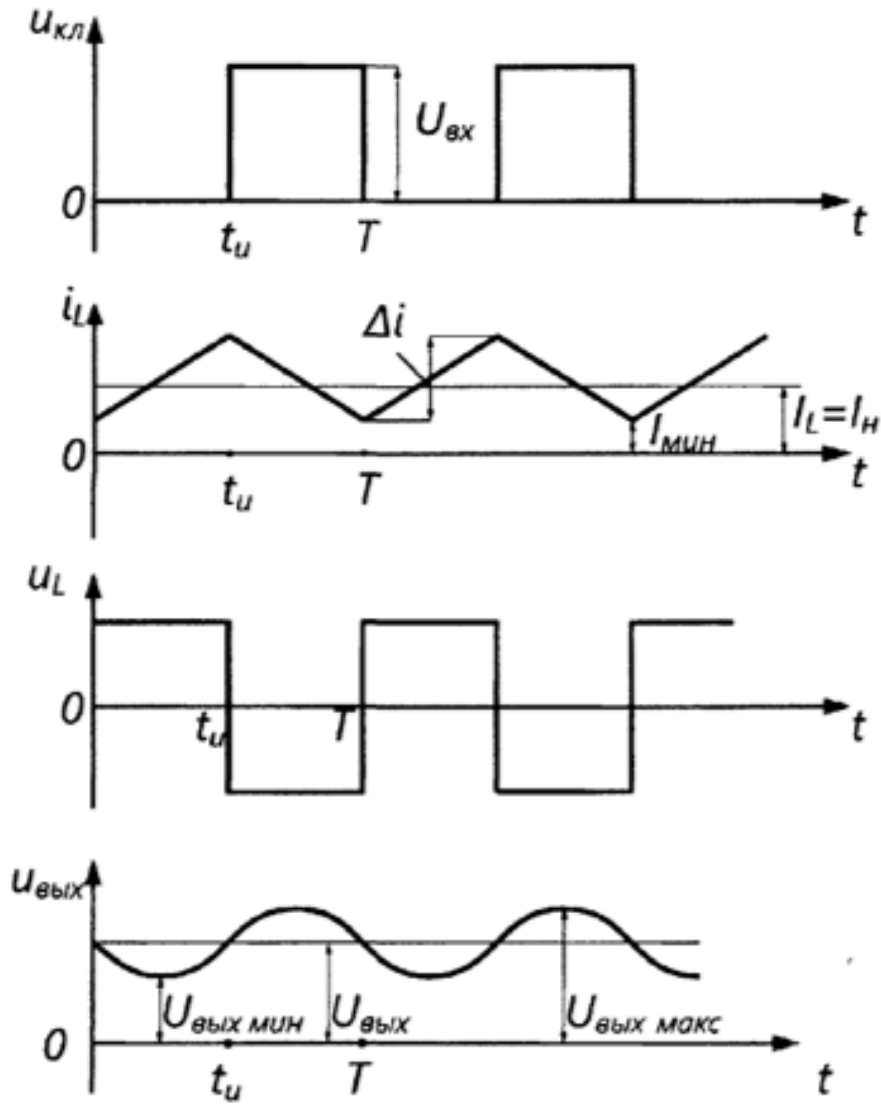


Рисунок 4 – Временные диаграммы работы понижающего импульсного преобразователя.

Если ключ замкнут, диод D смещен в обратном направлении, и входное напряжение $U_{вх}$ подключено только к L. Ток в индуктивности возрастает до максимального значения, либо от нуля, либо от определенного начального значения при непрерывном режиме работы. Когда ключ разомкнут, напряжение L меняет знак, в результате чего напряжение на диоде становится выше входного напряжения. Диод передает энергию, запасенную в индуктивности и энергию от входного источника на сглаживающую емкость и нагрузку. Таким образом, выходное напряжение $U_{вых}$ всегда больше, чем входное $U_{вх}$. Регулировочная характеристика повышающего преобразователя получается аналогичным способом и имеет следующий вид:

$$U_{вых} = \frac{U_{вх}}{1-D} \tag{5}$$

Как и ранее, для рассмотренного идеализированного случая выходное напряжение зависит только от входного напряжения и коэффициента заполнения. Таким образом, контролируя скважность, можно изменять выходное напряжение [5].

Временные диаграммы, иллюстрирующие работу повышающего регулятора, приведены на рис. 5.

Видно, что ток, подаваемый на выходной сглаживающий конденсатор - это ток диода, который всегда будет прерывистым. Это означает, что выходной конденсатор должен иметь большую емкость, с низким эквивалентным последовательным сопротивлением для получения приемлемого уровня выходных пульсаций. В этом отличие требований для выходного конденсатора повышающего регулятора от требований для емкости понижающего регулятора, описанного ранее. С другой стороны, входной ток —

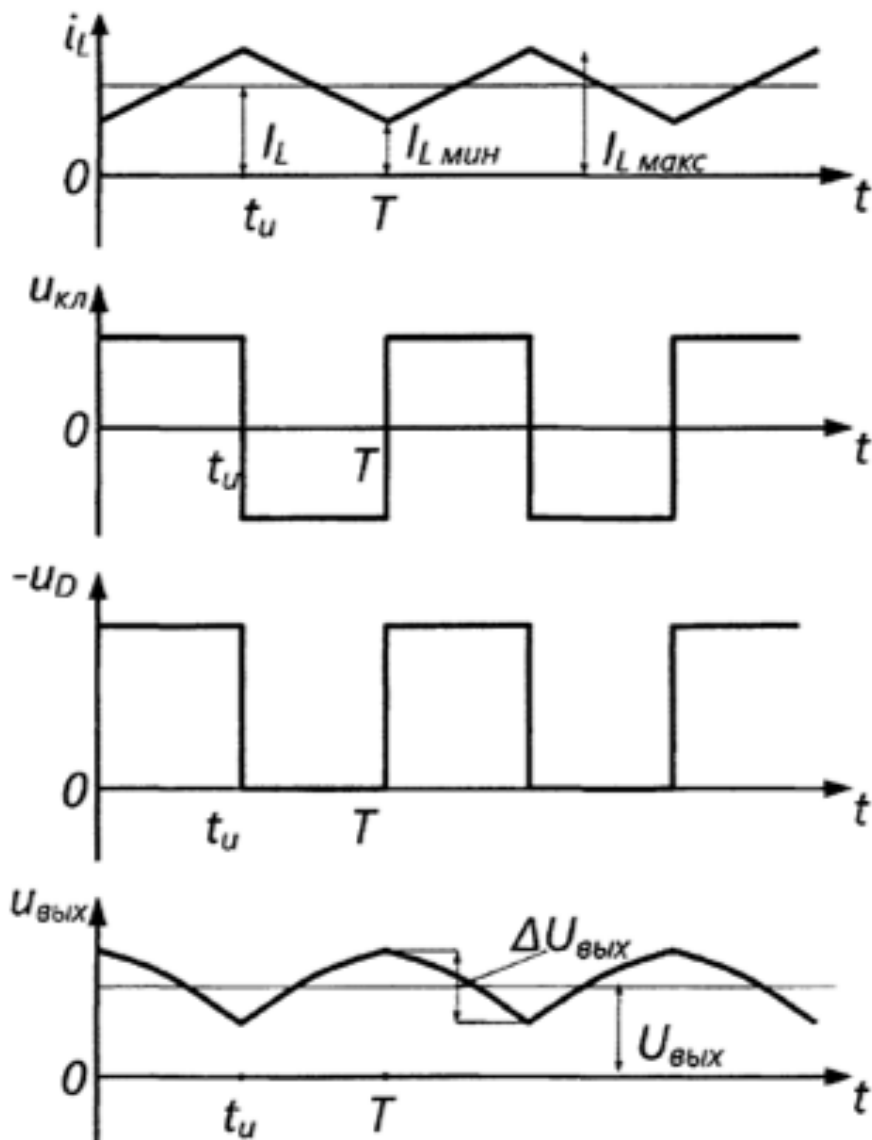


Рисунок 5 – Временные диаграммы повышающего импульсного преобразователя.

это, как правило, непрерывный ток дросселя, что обеспечивает низкие входные пульсации.

Третий базовый тип преобразователя без гальванической развязки – **инвертирующий или обратногоходовой преобразователь** – может быть получен из тех же компонентов, что и предыдущие. Его схема представлена на рис. 6.

Если ключ замкнут, диод смещен в обратном направлении и вход подключен через индуктивность, в которой запасена энергия, как описано ранее. При выключении, напряжение дросселя меняется на противоположное и запасенная энергия передается в конденсатор и нагрузку через открытый диод.

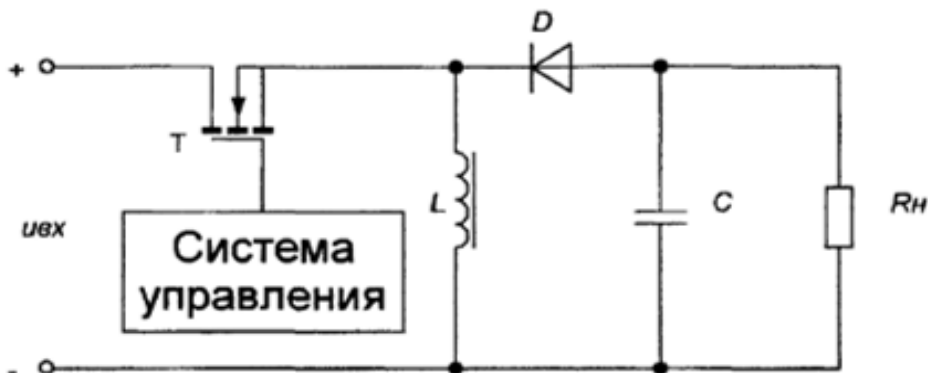


Рисунок 6 – Схема инвертирующего импульсного преобразователя.

Особенностью данного преобразователя является то, что выходное напряжение имеет обратную полярность относительно входного. Анализ показывает, что регулировочная характеристика инвертирующего преобразователя имеет вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{DU_{\text{ВХ}}}{1-D} \quad (6)$$

В зависимости от коэффициента заполнения D выходное напряжение может быть как меньше, так и больше входного по амплитуде. Это делает данный преобразователь гибким решением для ряда задач, например, в качестве предварительного регулятора в системах двойного преобразования.

При использовании данного преобразователя трудно добиться низкого уровня пульсаций. Обычно требуется очень большой выходной фильтрующий конденсатор.

Транзистор также должен быть рассчитан на большие токи, а также поддерживать высокие напряжения. Транзистор в инвертирующем регуляторе испытывает большие нагрузки. Выпрямительный диод также испытывает большие пульсации тока, что приводит к увеличению динамических потерь.

Рассмотренные преобразователи без гальванической развязки имеют ограниченную область применения. Развязка необходима практически всегда для источников питания, подключаемых к промышленной сети переменного тока. При ее отсутствии источники питания становятся небезопасными, поскольку даже при низком и безопасном выходном напряжении, разность потенциалов между выходными клеммами и землей достигает больших значений. Кроме того, из-за отсутствия трансформатора рассмотренные типы преобразователей не могут обеспечивать выходные напряжения, которые значительно отличаются от входных. Поэтому **трансформаторные импульсные источники питания (ИИП)**, рассмотренные ниже, имеют значительно большую область применения.

Высокочастотный трансформатор, включенный между входом и выходом преобразователя, позволяет преодолеть большинство из указанных выше

ограничений и имеет следующие преимущества:

- Гальваническое разделение входа и выхода, что необходимо для обеспечения безопасности выходов при питании от сетей 220 / 380 В.
- Коэффициент трансформации может быть выбран так, что выходное напряжение будет сильно отличаться от входного.
- Выбором правильного коэффициента трансформации можно также оптимизировать выбор скважности работы преобразователя, и минимизировать пиковые токи.
- количество выходов просто увеличивать, добавляя трансформатору вторичные обмотки. При этом можно обеспечить разную полярность выходных напряжений, просто изменяя полярность вторичных обмоток относительно первичной.

У подобных ИИП также имеются недостатки, основные из которых обусловлены наличием трансформатора. Например, индуктивность рассеяния трансформатора в большинстве схем приводит к появлению выбросов напряжения при закрытии силового ключа. В то же время, ряд проблем обусловлен наличием индуктивности намагничивания, которая насыщается при превышении тока, что может стать причиной выхода из строя преобразователя. То есть, необходимо контролировать ток намагничивания и обеспечить цикл размагничивания или перемагничивания трансформатора.

В зависимости от режима работы трансформатора, преобразователи делятся на одноктактные и двухтактные.

В одноктактных преобразователях рабочая точка намагничивания сердечника трансформатора всегда находится в одном квадранте, т. е. напряженность и индукция магнитного поля не меняют знак, и используется только половина магнитного потока. Одноктактные преобразователи принято разделять на обратнотактовые и прямоходовые. В обратнотактовых преобразователях передача энергии в нагрузку происходит в интервалы времени, когда ключ находится в закрытом состоянии. Таким образом, энергия не может

непосредственно передаваться из первичных цепей в нагрузку, а должна накапливаться в реактивных элементах схемы (как правило, трансформаторе). Прямеходовые преобразователи более эффективно используют магнитные материалы сердечников, поскольку способны транслировать большую часть энергии из первичных цепей непосредственно в нагрузку.

Двухтактные преобразователи обычно имеют четное число транзисторных ключей. Их преимущество перед одноктактными преобразователями обусловлено тем, что в каждом такте изменяется полярность напряжения, приложенного к первичной обмотке трансформатора. Тем самым, обеспечивается перемагничивание трансформатора. Таким образом, двухтактные преобразователи более эффективно используют магнитный материал, чем одноктактные. Благодаря этому двухтактные преобразователи в целом обладают лучшими параметрами удельной мощности и повсеместно используются для создания ИИП средней и большой мощности.

Следует отметить, что такие ИИП должны быть рассчитаны на подключение к промышленной сети переменного тока. Поэтому, наибольший интерес для дальнейшего исследования представляют именно преобразователи с гальванической развязкой [7, 8].

Физические принципы работы силового импульсного выпрямительного устройства технологического оборудования

Рассмотрим принцип и особенности работы выпрямительного устройства технологического оборудования.

В качестве выпрямительного устройства технологического оборудования, как указывалось выше, наиболее эффективно использовать силовой импульсный преобразователь, выполненный по симметричной однополупериодной схеме.

КПД такого импульсного преобразователя определяется эффективностью преобразования переменного напряжения в постоянное напряжение, необходимое для питания нагрузки, а значит величиной электрических потерь. В типовом импульсном преобразователе общие потери

энергии состоят из потерь проводимости $P_{\text{пров}}$ и коммутационных потерь $P_{\text{комм}}$. Потери проводимости, если не учитывать пульсацию токов, зависят от суммарного активного сопротивления. В этом случае эффективность преобразователя определяется выражением:

$$\eta = U_H I_H / (U_H I_H + P_{\text{комм}} + P_{\text{пров}}), \quad (7)$$

где U_H – напряжение нагрузки
 I_H – ток нагрузки.

Общие потери при токе нагрузки I_H и частоте коммутации f_s составят:

$$P_{\text{комм}} + P_{\text{пров}} = k_{\text{sw1}} I_H f_s + k_{\text{sw2}} f_s I_H + I_H^2 R_{\text{пр}}, \quad (8)$$

где $R_{\text{пр}}$ – активное сопротивление элементов преобразователя (проводников, обмоток, каналов транзисторов);

$k_{\text{sw1}}, k_{\text{sw2}}$ – коэффициенты, зависящие от используемого силового ключа.

Следует отметить, что обычно, с увеличением размеров и максимально допустимых параметров транзистора, коэффициенты k_{sw} также возрастают.

На практике при параллельной работе ключей в чередующемся режиме увеличивается эффективность преобразователя при полной нагрузке, т.к. уменьшается величина $R_{\text{пров}}$. В то же время, при малой нагрузке преобладают потери на коммутацию $P_{\text{комм}}$. Значения КПД преобразователя в каждый момент времени при различных нагрузках могут быть определены на основе зависимости КПД от реальной нагрузки.

Как показали исследования, импульсный преобразователь имеет высокие энергетические характеристики в диапазоне нагрузок от 50% до 90% от номинальной. При увеличении нагрузки до 100% энергетические характеристики незначительно снижаются, а при падении нагрузки до 20% резко падает КПД выпрямительного устройства. Работа устройства при нагрузках менее 20% сопровождается дальнейшим падением КПД, резким ростом пульсаций выходного напряжения и ухудшением стабильности работы. Кроме того, при работе в режиме низких нагрузок возрастает тепловыделение и перенапряжение на силовых элементах выпрямительного устройства, что приводит к резкому сокращению срока службы этих силовых элементов и следовательно выпрямительного устройства в целом.

Эти явления связаны с так называемым переходом устройства в режим «разрывных» токов.

Постоянное напряжение, снимаемое с выхода, получается из импульсного посредством фильтрации при помощи LC-фильтра. При малых токах потребления ток через индуктивность L (дроссель) становится «разрывным». В момент разрыва тока резко растёт нагрузка на ключевые элементы устройства и нарушается работа цепи обратной связи, назначение которой – стабилизировать выходное напряжение. Поэтому работа силового импульсного выпрямительного устройства при нагрузке менее 10% от номинальной считается аварийным режимом.

Таким образом, в случае применения однополупериодных силовых импульсных выпрямительных устройств в электротехнических системах технологического оборудования возникают дополнительные потери при преобразовании переменного напряжения в постоянное ΔP , связанные с низким КПД выпрямительного устройства при его эксплуатации в зоне низких нагрузок.

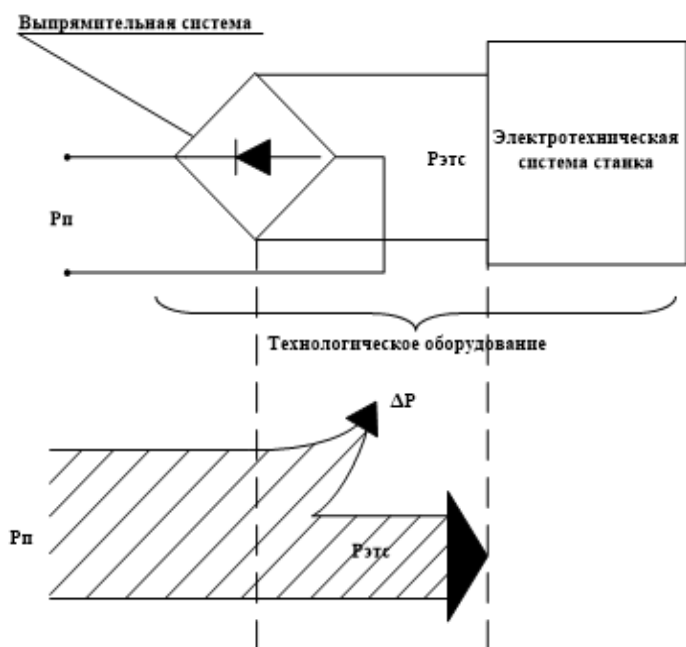


Рисунок 7 – Электротехническая система технологического оборудования с выделенным силовым выпрямительным устройством, где $P_{п}$ – полная мощность, $P_{этс}$ – мощность, потребляемая электротехнической системой, ΔP – потери при преобразовании переменного напряжения в постоянное.

На рис. 7 представлена упрощенная электротехническая система технологического оборудования с выделенным силовым выпрямительным устройством, иллюстрирующая вышеизложенное.

Исследование влияния параметров технологических процессов на энергетические характеристики силовых выпрямительных устройств.

Для экспериментального исследования зависимости коэффициента полезного действия существующих силовых выпрямительных устройств от текущей нагрузки была проведена серия экспериментальных исследований. Для этих целей был собран специализированный стенд, представляющий собой регулируемую нагрузку с программным управлением.

Работа стенда с регулируемой нагрузкой построена на свойстве полевых транзисторов с изолированным затвором (MOSFET) ограничивать ток, протекающий через цепь, в зависимости от напряжения на затворе.

На рис. 8 представлена схема установки для тестирования силовых выпрямительных устройств, работающая по следующему алгоритму: импульсный преобразователь с выходным напряжением $+V$ подключается к стенду. При вращении

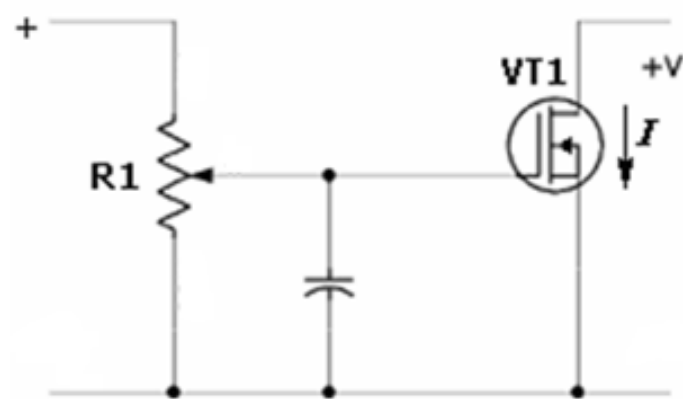


Рисунок 8 – Электротехническая система технологического оборудования с выделенным силовым выпрямительным устройством, где $P_{п}$ – полная мощность, $P_{этс}$ – мощность, потребляемая электротехнической системой, ΔP – потери при преобразовании переменного напряжения в постоянное.

ручки переменного резистора $R1$, происходит изменение напряжения на затворе транзистора $V1$, приводя к изменению протекающего через него тока I от нуля до максимального значения, определяемого характеристиками транзистора и/или тестируемого выпрямительного устройства.

Для целей исследования характеристик силового выпрямительного устройства был выбран стандартный импульсный преобразователь (блок питания) мощностью до 2000 Вт.

В ходе экспериментальных исследований производилось изменение нагрузки на блок от 50 Вт до максимально возможной с шагом 200 Вт. На каждом шаге производилось измерение мощности, потребляемой блоком от сети. Коэффициент полезного действия вычислялся как отношение мощности постоянного тока в нагрузке выпрямительного устройства, вычисляемой как произведение величины тока на значение напряжения, к потребляемой от сети переменного тока мощности. Потребляемая от сети мощность измерялась при помощи датчика мощности ДИМ, предназначенного для измерения активной составляющей полной мощности в промышленных сетях переменного тока промышленной частоты.

Результаты экспериментальных исследований зависимости КПД импульсных силовых выпрямительных устройств от нагрузки представлены на рис. 9.

Так, КПД такого вида устройств быстро возрастает по мере увеличения нагрузки, достигает максимума при приближении к номинальной мощности и затем медленно снижается.

Такая нелинейность характеристики приводит к некоторым особенностям эффективного применения импульсных выпрямительных устройств: паспортная мощность используемого преобразователя должна быть адекватна мощности нагрузки. При эксплуатации преобразователя с большим запасом мощности, низкая нагрузка на нем попадет в область графика, где КПД еще не достиг максимума. Так, например, при токе нагрузки 0,2 А, КПД составит всего 70 %, что недопустимо низко. Подобная ситуация может складываться не только по причине некорректного подбора мощности преобразователя, но и вследствие особенностей нагрузочных режимов потребителей.

Еще одним важнейшим показателем эффективности работы преобразователя является **стабильность выдаваемого выходного напряжения**. Для исследуемого полумостового импульсного выпрямительного устройства были проведены соответствующие исследования. Преобразователь нагружался активной нагрузкой. При измерении стабильности выходного напряжения входное переменное напряжение изменялось посредством регулировочного автотрансформатора в пределах от -20% до +15% от номинального

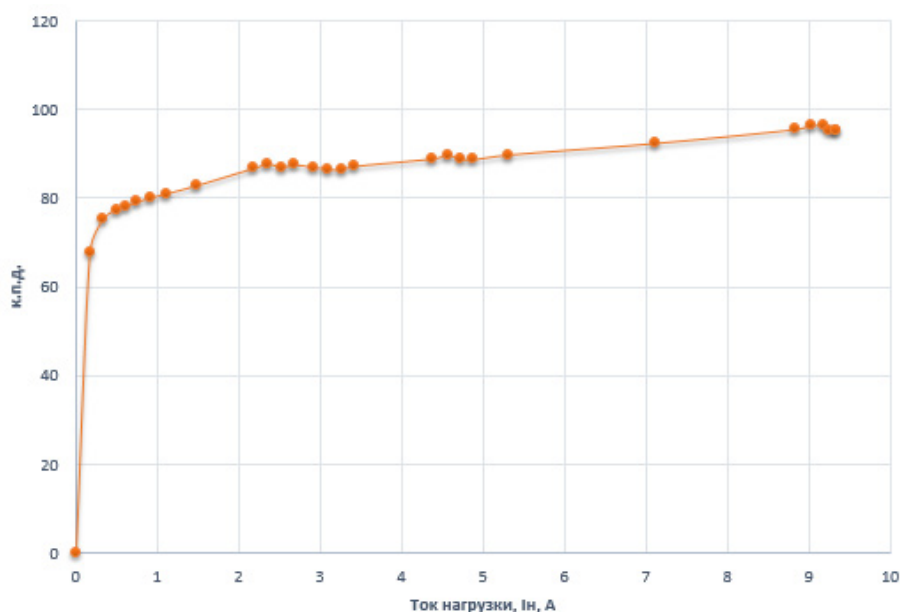


Рисунок 9 – Зависимость КПД импульсного выпрямительного блока от нагрузки.

напряжения сети.

Анализ проведенных экспериментальных исследований показал, что стабильность выходного напряжения силового импульсного выпрямительного устройства преобразователя изменяется до 7% в зоне низких (до 25%) нагрузок и до 3% в зоне высоких (более 90%) нагрузок (рис. 10).

Таким образом, энергоэффективность и стабильность выходного напряжения импульсных силовых выпрямительных устройств существенно зависит от нагрузки, причем наибольшая зависимость возникает при малых нагрузках.

В случае применения однополупериодных силовых импульсных выпрямительных устройств в электротехнических системах технологического оборудования возникают дополнительные потери при преобразовании переменного напряжения в постоянное ΔP , связанные с низким КПД выпрямительного устройства при его эксплуатации в зоне низких нагрузок.

Заключение. Т.о., проведенные исследования показали, что эксплуатация силовых импульсных выпрямительных устройств технологического оборудования в режиме низких нагрузок приводит к ухудшению их энергоэффективности

и к снижению стабильности выходного напряжения за счет перехода в режим «разрывного» тока при недостаточности внутреннего энергопотребления. В связи с тем, что избежать функционирования выпрямительных устройств в режимах низких нагрузок не представляется возможным (это связано с особенностями технологических процессов, реализуемых на промышленном оборудовании), необходимо найти пути повышения энергоэффективности таких устройств аппаратными методами. Так, например, включение в конструкцию выпрямителей блоков пассивной подгрузки или устройств рекуперации энергии позволит в значительной степени улучшить их энергетические показатели. Следовательно, для оптимизации энергопотребления промышленных предприятий, в особенности в условиях северных регионов, необходимо еще на этапе проектирования производственных процессов закладывать возможность аппаратной оптимизации оборудования, оснащенного силовыми импульсными выпрямительными устройствами.

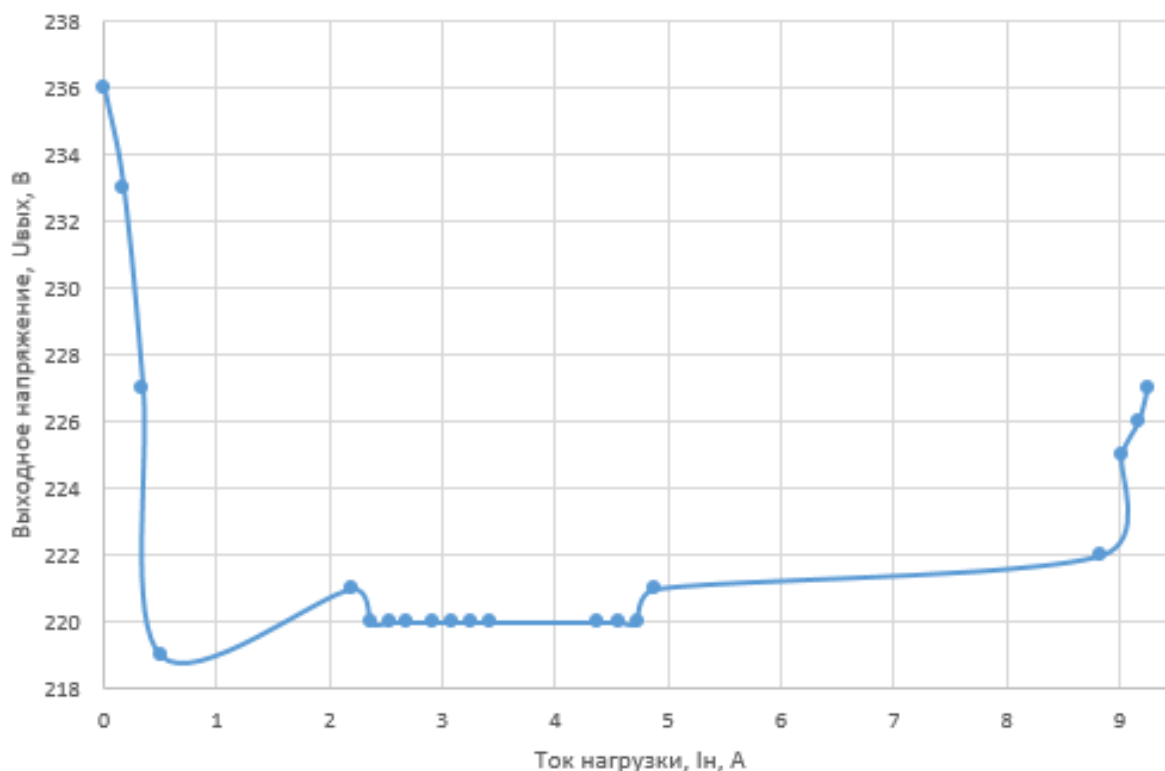


Рисунок 10 – Зависимость величины выходного напряжения от тока нагрузки для силового импульсного выпрямительного устройства.

Список литературы:

1. А.О. Пименов, Д.Г. Куликов, Е.Н. Гольцов, Г.И. Гречко Энергообеспечение в Арктике. Нефтегаз.ру. №1, 2018, с. 24-29.
2. В. М. Бушуев, В. А. Демянский, Л. Ф. Захаров и др. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций: Учебное пособие для вузов / М.: Горячая линия—Телеком, 2009. — 384 с.: ил.
3. Хайро Д.А. Автоматизация и управление силовыми выпрямительными устройствами для повышения энергоэффективности при переменных нагрузках. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук // ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН». Москва, 2015.
4. Тукшаитов Р.Х. О коэффициенте мощности и $\cos \phi$ выпрямительного устройства при разных активно-емкостных нагрузках и уровне эмиссии в электросеть высших гармоник // Практическая силовая электроника. 2019. № 3 (75). С. 53-55.
5. Змиева К.А., Кузнецова Е.В., Углева Е.М. Моделирование сети электроснабжения промышленного предприятия с использованием постоянного тока. Вестник МГТУ «СТАНКИН». - №4, 2014, с. 154-160.
6. Бочаров В.В., Коняхин С.Ф., Резников С.Б. Двухуровневая транспортно-бортовая система электроснабжения постоянного тока // Практическая силовая электроника. 2011. № 3 (43). С. 26-28.
7. Терешин М.В., Кулагин О.А. Оперативное регулирование процесса резания в технологических системах металлообработки. Вестник МГТУ «СТАНКИН», №2(25), 2013, с. 25-30
8. Змиева К.А., Козлов Д.В., Кузнецова Е.В., Должикова Е.Ю., Туманов Д.С. Разработка алгоритма функционирования автоматизированной системы контроля и управления потреблением ресурсов для административных зданий. Вестник МГТУ «СТАНКИН», №2(25), 2013, С. 68-73.
9. Хайро Д.А. Повышение энергоэффективности силовых импульсных преобразователей в режиме малых нагрузок // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 3. С. 83-88.
10. Змиева К.А., Кузнецова Е.В. Методика расчета коэффициента мощности электродвигателя в условиях несинусоидальности тока и напряжения // Вестник МГТУ «СТАНКИН», №4 (17), 2011, С. 39-42.
11. Александров Д.С., Калашников А.С. Структурный метод расчета токов замыкания в цепях выпрямительных установок // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2019. № 2 (86). С. 55-66.
12. Змиева К.А. Моделирование сети электроснабжения промышленного предприятия с использованием постоянного тока // Электротехника. 2015. № 5. С. 2-9.

References:

1. A.O. Pimenov, D.G. Kulikov, E.N. Gol'cov, G.I. Grechko Energoobespechenie v Arktike. // Neftegaz.ru. №1, 2018, s. 24-29.
2. V. M. Bushuev, V. A. Demyanskij, L. F. Zaharov i dr. Elektropitanie ustrojstv i sistem telekommunikacij: Uchebnoe posobie dlya vuzov / M.: Goryachaya liniya—Telekom, 2009. — 384 s.: il.
3. Hajro D.A. Avtomatizaciya i upravlenie silovymi vypryamitel'nymi ustrojstvami dlya povysheniya energoeffektivnosti pri peremennyh nagruzkah. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk // FGBOU VPO MGTU «STANKIN». Moskva, 2015.
4. Tukshaitov R.H. O koefficiente moshchnosti i $\cos \phi$ vypryamitel'nogo ustrojstva pri raznyh aktivno-empkostnyh nagruzkah i urovne emissii v elektroset' vysshih garmonik // Prakticheskaya silovaya elektronika. 2019. № 3 (75). S. 53-55.
5. Zmиеva K.A., Kuznecova E.V., Ugleva E.M. Modelirovanie seti elektrosnabzheniya promyshlennogo predpriyatiya s ispol'zovaniem postoyannogo toka. // Vestnik MGTU «STANKIN». - №4, 2014, s. 154-160.
6. Bocharov V.V., Konyahin S.F., Reznikov S.B. Dvuhurovnevaya transportno-bortovaya sistema elektrosnabzheniya postoyannogo toka // Prakticheskaya silovaya elektronika. 2011. № 3 (43). S. 26-28.
7. Tereshin M.V., Kulagin O.A. Operativnoe regulirovanie processa rezaniya v tekhnologicheskikh sistemah metalloobrabotki. // Vestnik MGTU «STANKIN», №2(25), 2013, s. 25-30
8. Zmиеva K.A., Kozlov D.V., Kuznecova E.V., Dolzhikova E.YU., Tumanov D.S. Razrabotka algoritma funkcionirovaniya avtomatizirovannoj sistemy kontrolya i upravleniya potrebleniem resursov dlya administrativnyh zdaniy // Vestnik MGTU «STANKIN», №2(25), 2013, S. 68-73.
9. Hajro D.A. Povyshenie energoeffektivnosti silovyh impul'snyh preobrazovatelej v rezhime malyh nagruzk / Vestnik MGTU «STANKIN». 2012. № 3. S. 83-88.
10. Zmиеva K.A., Kuznecova E.V. Metodika rascheta koefficienta moshchnosti elektrodvigatelya v usloviyah nesinusoidal'nosti toka i napryazheniya // Vestnik MGTU «STANKIN», №4 (17), 2011, S. 39-42.
11. Aleksandrov D.S., Kalashnikov A.S. Strukturnyj metod rascheta tokov zamykaniya v cepyah vypryamitel'nyh ustanovok // Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. № 2 (86). S. 55-66.
12. Zmиеva K.A. Modeling of an industrial enterprise power supply system using direct current // Russian Electrical Engineering. 2015. T. 86. № 5. C. 239-245.

ФОРМУЛИРОВКА КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ МИКРОГРИД АРКТИЧЕСКОГО АНКЛАВА В МУЛЬТИАГЕНТНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Г.П. Павлюк¹, А.К. Абд-Эльрахим¹, В.А. Шихин¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

✉ PavliukGP@mpei.ru, Aminkamal90@hotmail.com, ShikhinVA@mpei.ru

Предлагается подход для формулировки задачи многокритериальной оптимизации при управлении генерацией в микро-энергосистеме (microgrid), представленной в виде мультиагентной системы (МАС). Предлагаемый в работе подход основан на схеме, разработанной для оценки эффективности функционирования как микрогрид в целом, так и отдельных её фрагментов (агентов-субъектов), что позволяет формализовать процесс интеграции разнородных целевых функций в единые критерии по определенным типовым индексам эффективности функционирования микроэнергосистемы: технические, экономические и экологические критерии. Схема алгоритма оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы построена на примере проектирования гибридно-генерирующей и экологически безопасной тепло-электро-снабжающей системы арктического анклава.

Ключевые слова: мультиагентная система, микрогрид, арктический анклав, эффективность микро-энергосистемы.

FORMULATION OF COMPLEX OPTIMIZATION PROBLEM OF CONSTRUCTING MICROGRIDS IN THE ARCTIC ENCLAVE BASED ON MULTI-AGENT REPRESENTATION

G.P. Pavliuk¹, A.K. Abd Elraheem¹, V.A. Shikhin¹

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

In this paper, an approach for multi-objective optimization for agent-based microgrid energy production is proposed. The approach represented in this paper is based on analyzing microgrid objects as distributed agents forming a multi-agent system (MAS), which gives the possibility to evaluate the efficiency of microgrid as a whole, as well as the functioning efficiency of each separate agent. The elaborated scheme also gives the possibility to formalize the process of integrating heterogeneous objective functions into certain combined criteria. The construction of the algorithm for evaluating the efficiency of the micro-energy system is carried out in relation to the example of designing a hybrid-generating and environmentally safe heat-electric supply system of the Arctic enclave.

Keywords: multi-agent system, microgrid, arctic enclave, microgrid efficiency.

Статья получена: 14.11.2019

Принята к публикации: 14.01.2020

Опубликована онлайн: 27.03.2020

Введение

В настоящее время широко обсуждаются перспективы развития энергетики и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в удаленных населенных пунктах, в том числе в арктических регионах. На законодательном уровне предусмотрены меры по поддержке ВИЭ как на оптовом, так и на розничном рынках. Вместе с тем, ведется работа по повышению энергетической эффективности хозяйствующих субъектов в Арктике в соответствии с Федеральным законом «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности».

В удаленных регионах, таких как арктические, внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является одним из применимых решений проблемы обеспечения энергии. Однако вопрос повышения эффективности локальных энергосистем, в том числе с ВИЭ, остаётся актуальным. Повышение эффективности связано не только с внедрением эффективных источников энергии, но и с совершенствованием способов и технологий работы и управления локальными микро-энергосистемами (микрогрид).

Микрогрид [1] является разновидностью smart grid, которой присущи следующие особенности: единое объединение разнородных распределенных и централизованных источников энергии, возобновляемых источников энергии, накопителей энергии и разнотипных потребителей. При этом микрогрид функционирует как при гибридном энергоснабжении, так и обеспечивается надёжное снабжение потребителей при условии полного отделения от централизованного источника, т.е. в изолированном режиме. Важно отметить, что микрогрид представляет собой комбинацию управляемых и неуправляемых источников энергии, что затрудняет достижение баланса мощности в микрогрид, повышает актуальность регулирования напряжения и соотношения активной и реактивной мощности в распределительной сети.

Особенности локальных микро-энергосистем

Стратегии управления микроэнергосистемы могут существенно и даже концептуально отличаться от стратегий управления традиционными энергосистемами. Основные причины заключаются в следующем [2]:

- стационарные и динамические характеристики субъектов микрогрид существенно отличаются от аналогичных характеристик мощных энергоустановок;
- микроэнергосистемы подвержены значительному дисбалансу из-за наличия однофазных нагрузок и / или нестабильности распределенной генерации;
- значительная часть выработки электроэнергии в микрогрид может поступать от «неуправляемых» источников (например, ветроэлектрические установки ВЭУ), когда для максимизации выходной мощности возобновляемого источника энергии используется стратегия управления на базе максимальной точки отслеживания мощности (MPPT) [2];
- широко применяемые в микрогрид накопители энергии могут играть важную роль в реализации управления микроэнергосистемой и обеспечением ее устойчивой работы, однако следует учитывать то, что они являются частично-управляемыми источниками;
- субъекты микроэнергосистемы подвержены частым коммутациям и перекоммутациям по условиям обеспечения надежности энергоснабжения и качества электроэнергии;
- в дополнение к выработке и поставке электрической энергии, микро-энергосистема, как правило, отвечает за производство и подачу тепла ко всем или части потребителей;
- в рамках микрогрид предусматриваются более широкие возможности по децентрализации управления передачей и потреблением электроэнергии, однако сохраняется принцип сочетания централизованного и децентрализованного управления.

- Существующие погрешности измерений и ошибки при передаче информации по линиям связи являются более чувствительными в мелкомасштабных локальных системах, каковыми являются микроэнергосистемы.
- В рамках микрогрид, решения, принимаемые для какого-либо субъекта, оказывают, как правило, существенное влияние на принимаемые решения и управление процессами на других участках микроэнергосистемы.

Таким образом, указанные специфические черты отдельных субъектов и микроэнергосистемы в целом приводят к тому, что данная динамическая система может быть охарактеризована как нелинейная непрерывно-дискретно-событийная система с переменными слабо-предсказуемыми параметрами и перекрестными связями. Проведение аналитических исследований таких систем крайне затруднительно и возможно только при существенных упрощениях, которые, как правило, не допустимы по соображениям потери важной информации.

В связи с указанными выше характеристиками подобных систем, относящихся к рассматриваемому классу, задача нахождения эффективных, применимых подходов для решения задачи многокритериальной оптимизации микроэнергосистем в реальном времени является актуальной проблемой.

Примером таких микро-энергосистем, автоматизация и оптимальное управление которыми на сегодня является актуальной задачей не только в России, но и за рубежом (используется термин «смарт-грид» или «микрогрид»), являются обособленные (автономные или частично автономные) системы генерации и энергоснабжения в труднодоступных районах (например, высокогорье), в районах Крайнего Севера и Арктики, островные системы, бортовые системы крупных судов [3] и т.д. В рамках указанных микро-энергосистем различные субъекты системы активно взаимодействуют в реальном времени в процессе функционирования единой технологически объединенной системы.

Для целей повышения эффективности функционирования микроэнергосистемы в соответствии с устанавливаемыми применительно к конкретным условиям критериями, очевидна необходимость перехода к интеллектуальному автоматизированному управлению, гибко учитывающему множество факторов, разнопланово влияющих на протекающие процессы в единой системе.

Важным фактором, определяющим формат решения задач оптимизации функционирования микро-энергосистем, является необходимость следования нормам международного стандарта по интеграции систем управления предприятием ГОСТ Р МЭК 62264-1-2010 «Интеграция систем управления предприятием» [4] как это показано в [5].

Применение МАС в задачах управления микрогрид

В последние годы мультиагентная форма представления многокомпонентных динамических систем находит всё большее применение [6, 7], в том числе для исследования микро-энергосистем [8, 9], позволяя создавать иерархические системы управления на основе распределения функций управления между автономными и кооперативными агентами, реализуя такие важные характеристики, как модульность, гибкость, надёжность, реконфигурируемость и т. п. Применение МАС-технологии в приложении к рассмотрению микро-энергосистем позволяет по-новому подойти к решению задачи создания систем с комбинированным централизованным и децентрализованным управлением.

Решение оптимизационных задач, связанных с многоцелевым управлением, при наличии противоречивых критериев и неравновесным распределением критериев между разнородными субъектами динамической системы можно связать с мультиагентным представлением исходной системы и предложить эффективные методы решения по оптимизации её функционирования.

Как известно, решение задач управления в сложных динамических системах, под которыми обычно понимаются

системы высокой размерности, с наличием разветвлённой структуры с перекрестными связями, наличием неопределённости различных типов, нелинейностей и др., связано с подходами на основе декомпозиции систем такого рода. В этом смысле МАС-технология предлагает именно такую декомпозицию на основе введения в рассмотрение взаимосвязанных агентов. Итак, применение мультиагентных подходов является перспективной технологией для управления и принятия решений в системах, где существуют распределённое управление и неопределённость, связанная как с реализуемым каждым агентом законом управления, слабопредсказуемым поведением внешней среды, возможными потерями в полной наблюдаемости и управляемости объектами.

Следует отметить, что применение мультиагентного подхода позволяет более полно отразить наличие данных по отдельным субъектам (агентам) системы,

что обуславливает возможность получения более обоснованных решений, что ведет к повышению эффективности функционирования как системы в целом, так и каждого агента в отдельности.

На рис. 1 приведено формализованное представление агента, принятое в данной работе с учётом основных функциональных черт, присущих агенту: рассуждение, самонастройка, самооптимизация, коммуникабельность, активность.

Предлагается набор агентов, отражающих основные субъекты микрогрид (Табл. 1). Однако перечень агентов может быть расширен для более подробного описания или в связи с конкретными специфическими чертами рассматриваемой системы. Например, для наногрид (малая микроэнергосистема) необходимо учитывать инвертеры в качестве отдельного субъекта системы, поскольку они оказывают более значимое влияние на устойчивость и качество процессов [10].

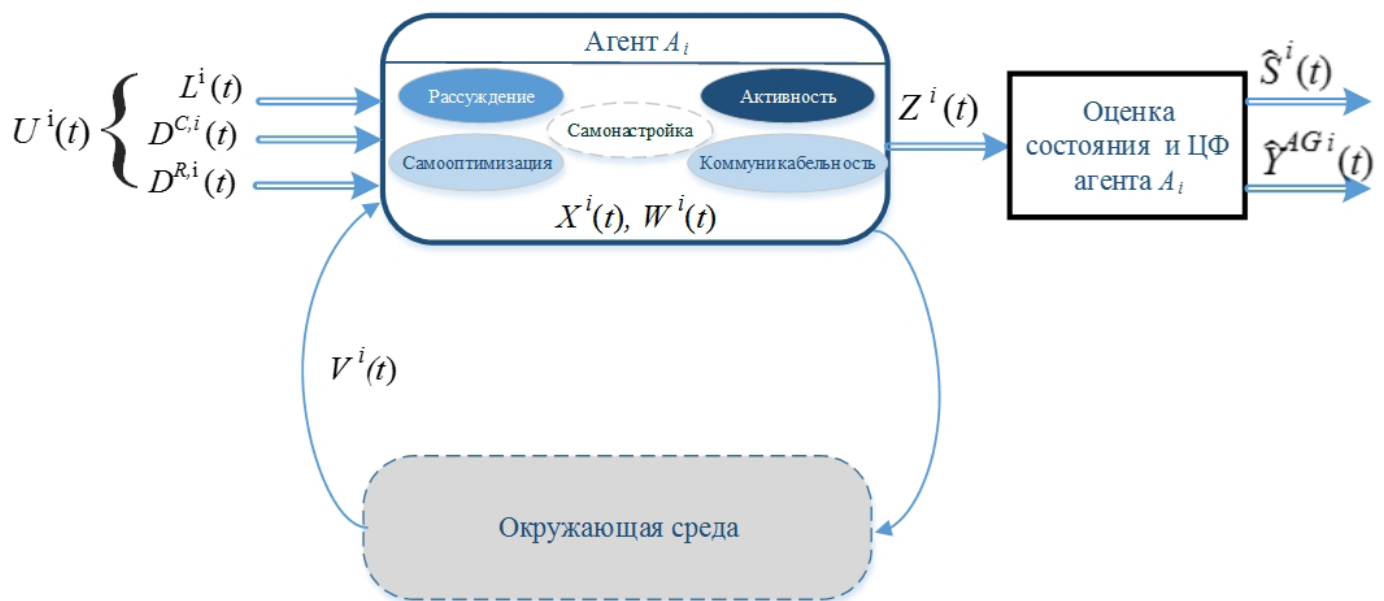


Рисунок 1 – Формализованное представление агента МАС:

$U^i(t)$ — вектор входных ограничений и уставок, связанный с функциональной чертой «коммуникация», при этом $U^i(t) = [L^i, DC, i, DR, i]^T$, где

L^i — технологические ограничения агента;

DC, i — вектор входных команд;

DR, i — вектор входных рекомендаций;

$Z(t)$ — вектор выходных переменных, характеризующих протекание физических процессов во времени, по которым идентифицируется состояние агента;

$S(t)$ — вектор состояний агента, связанный с его функциональной чертой «активность», а также показатели качества его функционирования Y^{AG} ;

$X(t)$ — вектор параметров и событийно-изменяющихся констант агента, связанный с его функциональными чертами «самонастройка» (в отношении параметров) и «рассуждение» (в отношении констант);

$W(t)$ — вектор внутренних генерируемых управлений агента, связанный с его функциональной чертой «самооптимизация»

Формализованные агенты и их функциональность в составе МАС-микросетей

Агент, A_i	Функциональность, F_{ij}	Агент, A_i	Функциональность, F_{ij}
1. Центр управления и связи (ЦУС) микросетей, агент A_1	$F_{1,1}$ – ответственность за управление микросетей; $F_{1,2}$ – отслеживание и планирование режимов распределенных и возобновляемых источников энергии; $F_{1,3}$ – прогнозирование генерируемой мощности соответствующего источника ВИЭ; $F_{1,4}$ – прогнозирование состояния накопителей энергии; $F_{1,5}$ – стабилизация частоты в микросетей; $F_{1,6}$ – обеспечение динамической устойчивости микросетей	5. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечная электростанция (СЭС), агент A_5	$F_{5,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей СЭС
		6. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): ветровая электростанция (ВЭС), агент A_6	$F_{6,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей ВЭС
		7. Накопители энергии (НЭ), агент A_7	$F_{7,1}$ – участие в покрытии дефицита мощности; $F_{7,2}$ – участие в поглощении избытка мощности; $F_{7,3}$ – участие в регулировании частоты; $F_{7,4}$ – повышение динамической устойчивости микросетей
2. Распределительная электросеть (РЭС), включающая подстанцию, агент A_2	$F_{2,1}$ – ответственность за внешнее по отношению к микросетей электроснабжение, $F_{2,2}$ – прием излишков электроэнергии от микросетей во внешнюю электросеть	8. Спрос потребителя (ПЭЭ), агент A_8	$F_{8,1}$ – целевое использование электроэнергии
		9. Спрос ценозависимого потребителя (ЦЗП), агент A_9	$F_{9,1}$ – целевое использование электроэнергии; $F_{9,2}$ – участие в регулировании мощности
3. Распределенные дизель-генераторные установки (ДГУ), агент A_3	$F_{3,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределенного генератора или группы генераторов	10. База данных реального времени (БДРВ), агент A_{10}	$F_{10,1}$ – сбор, хранение, обмен данными и архивами
4. Распределенные газопоршневые установки (ГПУ), агент A_4	$F_{4,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределенного генератора или группы генераторов	11. Система имитационного моделирования (SIM), агент A_{11}	$F_{11,1}$ – моделирование, тестирование режимов функционирования микросетей

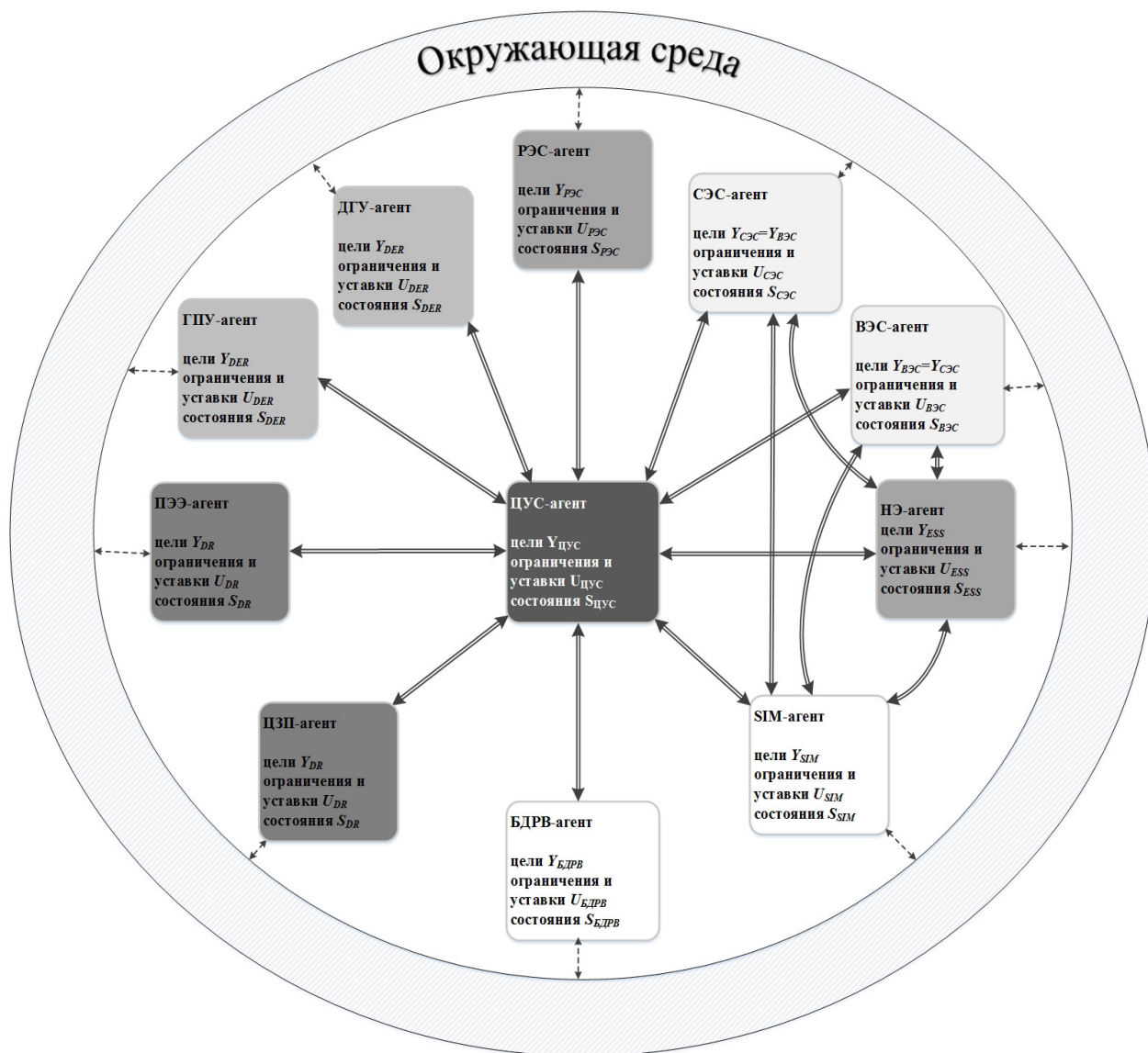


Рисунок 2 – Общая структура МАС микрогрид.

На рис. 2 показаны основные агенты типовой микроэнергосистемы и их взаимосвязь в процессе функционирования системы. Термин «окружающая среда» при этом имеет расширенное толкование, включая взаимодействие микрогрид с внешними, в том числе техническими системами.

Формулировка целевых функций эффективности функционирования микрогрид

Хотя большинство известных из литературы [11–13, 17] подходов к решению оптимизационных задач применительно к управлению микрогрид формулируется в рамках однокритериальной постановки, а именно на минимизацию общих эксплуатационных затрат или минимизацию потерь, имеются формулировки оптимизационных задач в многокритериальной

постановке [14]. Однако во всех этих подходах осуществляется сведение многокритериальной задачи к скалярному случаю, включая формальное объединение технических и экономических показателей, что, по мнению большинства специалистов в области создания и эксплуатации микро-энергосистем, недопустимо [15]. Эффективность функционирования микроэнергосистемы не рекомендуется оценивать единым интегрированным показателем и, как минимум, следует подразделять на относительно обособленное рассмотрение технической и экономической эффективности с введением соответствующих целевых показателей и критериев.

Соответственно, особенностью данной работы является то, что с учётом мнения отраслевых экспертов предлагается подход к формулированию

оптимизационных задач, связанных с повышением эффективности микроэнергосистемы и введением отдельного рассмотрения отдельных групповых показателей эффективности. В то же время, предложенное в работе мультиагентное представление микроэнергосистемы позволяет перейти к совокупному учёту показателей эффективности как отдельных агентов, так и системы в целом.

Основные критерии эффективности функционирования микроэнергосистемы представлены в табл. 2. На основе этих критериев были сформулированы целевые функции эффективности функционирования микроэнергосистемы (см. табл. 2).

Рассмотрим подробнее приведённые в табл. 2 критерии эффективности.

1. Качество электроэнергии (КЭ).

Качество производимой и отпускаемой потребителям электроэнергии является одним из основных критериев при оценке эффективности функционирования любой энергосистемы и регулируется в соответствии с ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», где указаны более 10 показателей, из которых выберем два в качестве целевых функций (без потери общности математической постановки задачи):

- отклонение основной частоты напряжения от номинального $\Delta f = f - f_{nom}$, которое связано прежде всего с дефицитом активной мощности и не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95 % времени;
- отклонение напряжения ΔU . Величины провалов и перенапряжений связаны с множеством факторов, в том числе с их случайным характером, учесть которые в компактном математическом выражении в общем случае не представляется возможным, но в первую очередь они связаны с соотношением активной и реактивной мощности. Отклонение напряжения в сети определяется на основе сравнения значений напряжения общей шины U^{SYS} и опорно-

го напряжения U_{ref} . Следовательно, $\Delta U = U_{ref} - U^{SYS}$.

2. Экономический критерий (ЭК).

Экономический критерий Y_2^{SYS} формируется из трёх составляющих: стоимость генерируемой электроэнергии

$y_3^{SYS} \triangleq C^{EN}$, цена для потребителя

$y_4^{SYS} \triangleq PR$, прибыль владельца микроэнергосистемы $y_5^{SYS} \triangleq REV$.

3. Надёжность процесса электроснабжения Y_3^{SYS} .

Надёжность процесса электроснабжения в микро-энергосистеме как и для больших электрических сетей оценивается с использованием нормативно установленных показателей. Возникновение технологических нарушений в элементах электрической сети и масштабы их последствий зависят от многих случайных факторов. Соответственно, исследование надёжности сетевых комплексов обосновано в рамках вероятностных категорий. Именно поэтому к настоящему времени накоплен отечественный и зарубежный опыт решения задач по оценке надёжности систем электроэнергетики со следующими тремя категориями, соответствующими международной классификации показателей надёжности:

CAIDI – индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (время ремонта);

SAIDI – индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (продолжительность отказа);

SAIFI – индекс средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей (частота отказов) [16].

4. Экологичность Y_4^{SYS} .

Экологичность функционирования микроэнергосистемы предлагается ограничить рассмотрением выброса парниковых газов (CO₂, NO_x и др.), хотя данные показатели не являются единственными.

Пример оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы для Арктического анклава

На рис. 3 показана общая функциональная схема микро-энергосистемы, подготовленная в рамках НИОКР межведомственной комплексной целевой

Критерии и показатели эффективности функционирования микроэнергосистемы

Критерий эффективности функционирования	Целевая функция	Оптимизационная задача на min или max	Входные переменные и параметры	Допустимый предел погрешности измерений
1. Качество электроэнергии (КЭ), Y_1^{sys}	1.1. Отклонение частоты $y_1^{sys} \stackrel{\Delta}{=} \Delta f$	Поддержание в заданных пределах Δf^+ , Δf^-	1.1.1. f_{nom} – номинальная частота; 1.1.2. f – текущее значение основной частоты напряжения; 1.1.3. Δf^+ , $\Delta f^- = \pm 0,2$ Гц	$\pm 0,03$ Гц
	1.1. Отклонение напряжения, $y_2^{sys} \stackrel{\Delta}{=} \Delta U$	Min	1.2.1. U_{nom} – номинальное напряжение; 1.2.2. U – текущее значение напряжения; 1.2.3. ΔU^+ , $\Delta U^- = \pm 10$ %	Погрешность измерения длительности не должна превышать $\pm 0,01$ с
2. Экономический критерий (ЭК), Y_2^{sys}	2.1. Стоимость генерируемой электроэнергии $y_3^{sys} \stackrel{\Delta}{=} C^{EN}$	Min	2.1.1. стоимость топлива C^F ; 2.1.2. расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание C^{OM} ; 2.1.3. плата / штрафы за выброс загрязняющих веществ C^{PO}	10 %
	2.2. Цена для потребителя $y_4^{sys} \stackrel{\Delta}{=} PR$	Min	2.2.1. Фиксированный многозонный тарифный график	1 %
	2.3. Прибыль владельца микроэнергосистемы $y_5^{sys} \stackrel{\Delta}{=} REV$	Max	2.3.1. цена продажи электроэнергии Pr^C ; 2.3.2. объем проданной электроэнергии P^{MG}	5 %
3. Надежность процесса электроснабжения Y_3^{sys}	3.1. Индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей, $y_6^{sys} \stackrel{\Delta}{=} CAIDI$	Min	3.1.1. суммарное время отключения потребителей, T_{Σ} ; 3.1.2. общее число отключений, OUT_{Σ}	1 %
	3.2. Индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей, $y_7^{sys} \stackrel{\Delta}{=} CAIDI$	Min	3.2.1. суммарное время отключения потребителей, T_{Σ} ; 3.2.2. общее количество потребителей, N_{Σ}	1 %
	3.3. Индекс средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей, $y_8^{sys} \stackrel{\Delta}{=} SAIFI$	Min	3.3.1. общее число отключений, OUT_{Σ} ; 3.3.2. общее количество потребителей, N_{Σ}	1 %
4. Экологичность Y_1^{sys}	4.1. Количество выбросов парниковых газов (углекислый газ) $y_9^{sys} \stackrel{\Delta}{=} CO_2$	Min	4.1.1. фактическое потребление топлива, M^{fuel} ; 4.1.2. Количество выбросов углекислого газа от источников энергии, PO^{CO_2}	10 %
	4.2. Количество выбросов парниковых газов (оксиды азота) $y_{10}^{sys} \stackrel{\Delta}{=} NOX$	Min	4.2.1. фактическое потребление топлива M^{fuel} ; 4.2.2. Количество выбросов оксидов азота от источников энергии, PO^{NOX}	10 %

программы «Арктические технологии» по теме «Автоматизированный комплекс управления высоконадежной гибридно-генерирующей и экологически безопасной тепло-электро-снабжающей микро-энергосистемой с высокими техноэкономическими показателями». Представленное на рис. 3 разработанное техническое решение может рассматриваться как базовое при использовании в задачах обеспечения надёжного снабжения энергоресурсами объектов арктических регионов, включающих объекты как промышленного строительства, так и жилой инфраструктуры. Вместе с тем, предлагаемое решение с зависимой и независимой от поставок топлива генерацией тепла и электроэнергии применимо к любым труднодоступным зонам, и может быть реализовано также при полном отсутствии магистральных линий электропередач.

Образец создаваемой пилотной микро-энергосистемы в Арктике представлен на рис. 3. в виде компактного анклава из следующих четырех относительно обособленных территориальных образований: - (I) Промышленная зона; - (II) Жилищно-коммунальный комплекс; - (III) Солнечная и ветровая электростанции; - (IV) Топлиохранилище.

Решение задачи оценки эффективности функционирования проектируемой пилотной микро-энергосистемы предлагается разбить на несколько этапов (рис.4).

На этапе 1 (см. рис. 4) решается задача выбора таких моделей описания агентов, которые адекватно соответствуют исследуемым целевым функциям (ЦФ) и отвечают ограничениям по точности (см. табл. 2) и информативности:

$$\text{МО } A_i \begin{matrix} \varepsilon_i \\ \leftrightarrow y_j^{\text{SYS}} \\ \Theta_i \end{matrix}$$

На этапе 2 производится синтез имитационной мультиагентной модели исследуемой системы с учетом специфики каждой ЦФ y_j^{SYS} , $j = 1, 10$ из четырех групп критериев, указанных в табл. 2.

Оценка показателей эффективности осуществляется параллельно с расчётом точности оценивания e_j , что является важной выходной информацией. В синтезированной мульти-агентной модели описания отдельные агенты функционируют в условиях взаимодействия соответствующих моделируемых общесистемных процессов, что позволяет произвести оценку их собственных ЦФ y_j^{AG} и решать задачи по самооптимизации и самонастройке (см. рис.1).

Этап 3 соответствует решению задачи получения численной оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы, сочетающей все четыре предложенных общесистемных критерия. По полученным оценкам показателей осуществляется расчёт оценки соответствующих критериев эффективности для системы в целом (см. табл. 2) Y_k^{SYS} , $k = 1, 4$ а также значений индивидуальных показателей эффективности функционирования отдельных агентов y_j^{AG} , приведённых в табл. 3. Представленная на рис. 4 схема отражает формализованный процесс интеграции разнотипных ЦФ в установленные критерии.

Заключение

Разработано унифицированное представление агента, применимое к микро-энергосистемам, представляющим собой композицию из субъектов, формализуемых в виде непрерывных, дискретных и дискретно-событийных моделей.

Разработана схема решения задачи оценивания эффективности микрогрид. Представленная схема позволяет формализовать процесс интеграции разнородных ЦФ в единые критерии по определённым типам, а также с учётом оценок эффективности функционирования отдельных агентов в взаимосвязанной системе.

Как показано в примере, предлагаемое решение оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы для Арктического анклава ведёт к решению многокритериальных оптимизационных задач, с учётом разнородных критериев.

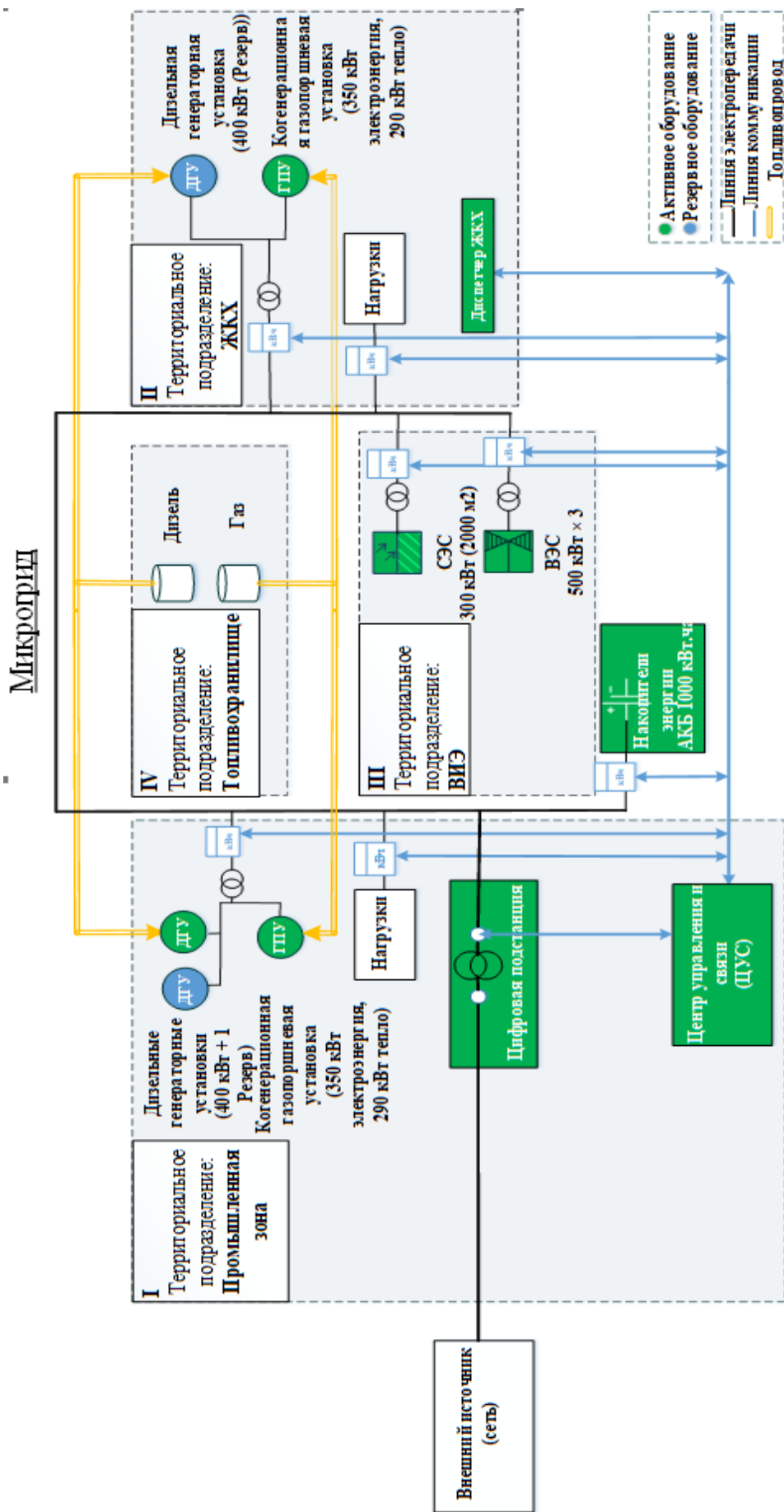


Рисунок 3 – Общая функциональная схема микросистемы для арктического анклава:

- (I) — промышленная зона;
 (II) — жилищно-коммунальный комплекс;
 (III) — солнечная и ветровая электростанции;
 (IV) — топливохранилище.

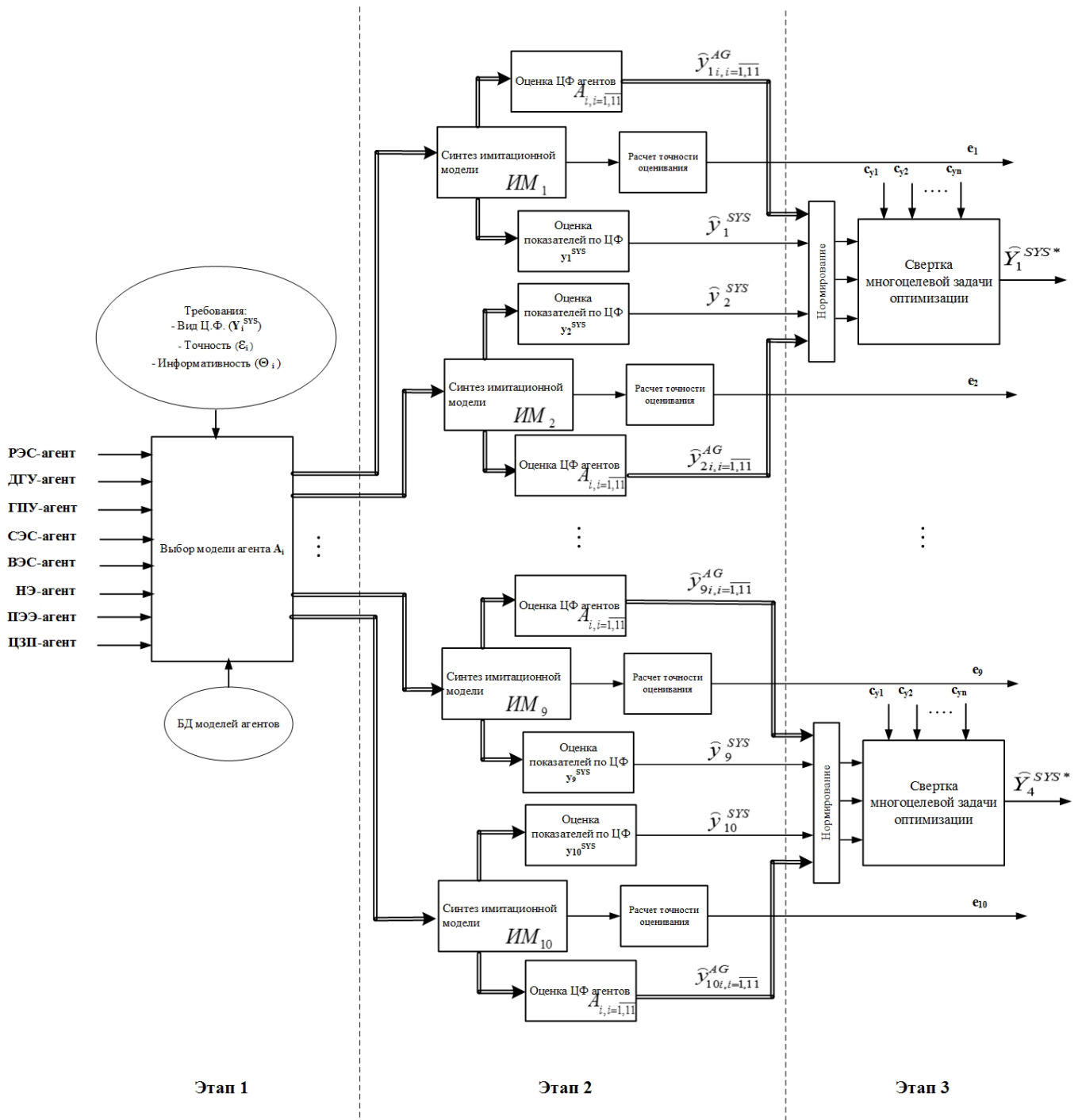


Рисунок 4 – Решение задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы:
 РЭС-агент – агент распределительной электрической сети;
 ДГУ-агент – агент дизель-генераторной установки;
 ГПУ-агент – агент газопоршневой установки;
 СЭС-агент – агент солнечной электростанции;
 ВЭС-агент – агент ветровой электростанции;
 НЭ-агент – агент накопителей энергии;
 ПЭЭ-агент – агент спроса потребителя;
 ЦЗП-агент – агент спроса ценозависимого потребителя;
 ϵ_i – точность модели агента A_i ;
 Θ_i – информативность модели агента A_i ;
 e_k – погрешность расчета показателя эффективности целевой функции Y_k^{SYS} ;
 c_{yk} – весовой коэффициент показателя эффективности целевой функции Y_k^{SYS}

Список литературы:

- Marnay C., Chatzivasileiadis S., Abbey C., Iravani R., Joos G., Lombardi P., Mancarella P., Appen J. Microgrid Evolution Roadmap: International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015 P. 139–144.
- Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A. "Microgrids management," IEEE Power Energy Mag., vol. 6, no. 3, pp. 54–65, May/June. 2008.
- Guerrero J.M., Jin Z., Liu W., Othman M.B., Savaghebi M., Anvari-Moghaddam A., Meng L., Vasquez J.C. Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies: Proceedings of the International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Asia 2016), Shanghai, China, 28–30 June 2016. P. 1–8.
- ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014 «Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология». – М.: Стандартиформ, 2016.
- Luis I. Minchala-Avila, Luis E. Garza-Castanon, Adriana Vargas-Martinez, and Youmin Zhang, "Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of Microgrids," in: Procedia Computer Science 52 (2015) pp. 780 – 787.
- Leitao P., Marik V., Vrba P. Past present and future of industrial agent applications // IEEE Trans. Ind. Inf. 2013. Vol. 9. No. 4, P. 2360–2372.
- Metzger M., Polaków G. A survey on applications of agent technology in industrial process control // IEEE Trans. Ind. Inf. 2011. Vol. 7. No. 4. P. 570–570.
- McArthur S., Davidson E., Catterson V., Dimeas A., Hatziargyriou N., Ponci, F., Funabashi T. Multi-agent systems for power engineering applications. P. 1 : Concepts, approaches and technical challenges // IEEE Transactions on Power Systems. 2007. Vol. 22. No. 4. P. 1743–1752.
- Kantamneni A., Brown L., Parker G., Weaver W. Survey of multi-agent systems for microgrid control // Engineering applications of artificial intelligence. 2015. No. 45. P. 192–203.
- Guarderas G., Francés A., Asensi R., Uceda J. Large-signal black-box behavioral modeling of grid-supporting power converters in AC microgrids: IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2017. P. 153–158.
- Dulau L.I., Bica, D. Optimization of Generation Cost in a Microgrid // Procedia Manufacturing. 2018. No. 22. P. 703-708.
- Nafisi H., Agha M.M., Abyaneh H.A., Abedi M.. Two-stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of phevs // IEEE Trans. Smart Grid. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 1268–1276.
- Wang Y., Huang Y., Wang Y., Li F., Zhang Y., Tian C. Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response // Sustainability. 2018. No. 10, P. 847–872.
- Dehghanpour K., Nehrir H. Real-Time Multiobjective Microgrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework // IEEE Trans. Smart Grid. 2017. Vol. 9. No. 6. P. 6318–6327.
- Постановление правительства РФ от 19 декабря 2016 г. № 1401. «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей».
- V. A. Shikhin, A. K. A. Elraheem, J. Ren, "Multi-agent approach for real-time optimal control of electro microgrid", 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), pp. 1-6, Oct 2018.
- Shikhin V.A., Pavluk G. P. Sensitive boarder method for control performance indices adjustment: Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference, Saint Petersburg, Russia, 2017, DOI:10.1109/ICIEAM.2017.8076417.

References

- Marnay C., Chatzivasileiadis S., Abbey C., Iravani R., Joos G., Lombardi P., Mancarella P., Appen J. Microgrid Evolution Roadmap: International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015 P. 139–144.
- Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A. "Microgrids management," IEEE Power Energy Mag., vol. 6, no. 3, pp. 54–65, May/June. 2008.
- Guerrero J.M., Jin Z., Liu W., Othman M.B., Savaghebi M., Anvari-Moghaddam A., Meng L., Vasquez J.C. Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies: Proceedings of the International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Asia 2016), Shanghai, China, 28–30 June 2016. P. 1–8.
- GOST R MEK 62264-1-2014. Integraciya sistem upravleniya predpriyatiem. CHast' 1. Modeli i terminologiya [State Standard 62264-1-2014. Integration of enterprise management systems. Part 1. Models and terminology]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p. (in Russian) . Moscow, Standartinform Publ., 2016. (In Russian).
- Luis I. Minchala-Avila, Luis E. Garza-Castanon, Adriana Vargas-Martinez, and Youmin Zhang,

- "Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of Microgrids," in: *Procedia Computer Science* 52 (2015) pp. 780 – 787.
6. Leitao P., Marik V., Vrba P. Past present and future of industrial agent applications // *IEEE Trans. Ind. Inf.* 2013. Vol. 9. No. 4, P. 2360–2372.
 7. Metzger M., Polaków G. A survey on applications of agent technology in industrial process control // *IEEE Trans. Ind. Inf.* 2011. Vol. 7. No. 4. P. 570–570.
 8. McArthur S., Davidson E., Catterson V., Dimeas A., Hatziargyriou N., Ponci, F., Funabashi T. Multi-agent systems for power engineering applications. P. 1 : Concepts, approaches and technical challenges // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007. Vol. 22. No. 4. P. 1743–1752.
 9. Kantamneni A., Brown L., Parker G., Weaver W. Survey of multi-agent systems for microgrid control // *Engineering applications of artificial intelligence*. 2015. No. 45. P. 192–203.
 10. Guarderas G., Francés A., Asensi R., Uceda J. Large-signal black-box behavioral modeling of grid-supporting power converters in AC microgrids: *IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2017. P. 153–158.
 11. Dulau L.I., Bica, D. Optimization of Generation Cost in a Microgrid // *Procedia Manufacturing*. 2018. No. 22. P. 703-708.
 12. Nafisi H., Agha M.M., Abyaneh H.A., Abedi M.. Two-stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of phevs // *IEEE Trans. Smart Grid*. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 1268–1276.
 13. Wang Y., Huang Y., Wang Y., Li F., Zhang Y., Tian C. Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response // *Sustainability*. 2018. No. 10, P. 847–872.
 14. Dehghanpour K., Nehrir H. Real-Time Multiobjective Microgrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework // *IEEE Trans. Smart Grid*. 2017. Vol. 9. No. 6. P. 6318–6327.
 15. Postanovlenie pravitel'stva RF ot 19 dekabrya 2016 g. № 1401. «O kompleksnom opredelenii pokazatelej tekhniko-ekonomicheskogo sostoyaniya ob"ektov elektroenergetiki, v tom chisle pokazatelej fizicheskogo iznosa i energeticheskoy effektivnosti ob"ektov elektrosetevogo hozyajstva, i ob osushchestvlenii monitoringa takih pokazatelej» [Decree of the Government of the Russian Federation of December 19, 2016 No. 1401. "On the comprehensive definition of indicators of the technical and economic condition of electric power facilities, including indicators of physical deterioration and energy efficiency of electric grid facilities, and on monitoring such indicators"]. (In Russian).
 16. V. A. Shikhin, A. K. Abd Elraheem, J. Ren, "Multi-agent approach for real-time optimal control of electro microgrid", 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), pp. 1-6, Oct 2018.
 17. Shikhin V.A., Pavluk G. P. Sensitive boarder method for control performance indices adjustment: *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2017 International Conference, Saint Petersburg, Russia, 2017, DOI:10.1109/ICIEAM.2017.8076417.

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛЕНТЫ ИЗ АМОРФНОГО СПЛАВА В КАЧЕСТВЕ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В СИСТЕМАХ ОБОГРЕВА И АНТИОБЛЕДЕНИЯ ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Д.В. Махнёв¹, К.А. Змиева²

¹ Северо-Западный институт управления — филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации», г. Санкт-Петербург, Россия

² Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

✉ makhnev@gmail.com, kirazmieva@mail.ru

В статье проведен анализ и рассмотрены преимущества использования ленты из аморфного сплава для применения в системах антиобледенения и обогрева в условиях арктических территорий.

Ключевые слова: аморфные сплавы, нагревательные элементы, системы обогрева, Арктика, системы антиобледенения.

USE OF AMORPHOUS ALLOY TAPE AS A HEATING ELEMENT IN HEATING AND DE-ICING SYSTEMS FOR ARCTIC TERRITORIES

D.V. Makhnev¹, K.A. Zmieva²

¹ Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Saint Petersburg, Russia

² Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

The article analyzes and considers the advantages of using amorphous alloy tape for use in de-icing and heating systems in the Arctic territories.

Keywords: amorphous alloys, heating elements, heating systems, Arctic, de-icing systems.

Статья получена: 27.03.2020

Принята к публикации: 01.04.2020

Опубликована онлайн: 10.04.2020

Сегодня северные арктические территории являются тем местом, где наиболее передовые и современные высокие технологии находят свое применение. В условиях развития полярных городов, расположенных вдоль северного морского пути, проблемы обеспечения грамотной эксплуатации жилых и промышленных зданий в условиях низких температур становятся особенно актуальными. Одной из задач, требующих решения, является задача разработки эффективных антиобледенительных систем для кровель зданий, предотвращающих скопление снега и наледей как на самой кровле, так и на водоотводящих желобах. (Рис. 1).

В стандартный состав антиобледенительной системы обычно входят:

- Нагревательный кабель. Схема его укладки определяется типом кровельной конструкции и конфигурацией водостока.
- Силовой электрический кабель (для соединения с сетью 220/380, 50Гц).
- Устройства защиты (отключают контур целиком при утечках свыше 30 мА и при превышении токов нагрузки) [1].
- Устройство управления. Система, реагирующая на сигналы датчиков температуры и влажности и запускающая или приостанавливающая

обогрев в рамках рабочих температур.

В производстве и домашних условиях используется широкое разнообразие нагревательных элементов. Изначально для производства таких элементов использовались металлы и металлические сплавы. Самой распространенной формой для нагревательного элемента считается кабель. За счет своих свойств и относительно низкой стоимости он является очень привлекательным для систем обогрева. Начиная с конца 20 века научно-техническое сообщество всерьез стало изучать возможность использования из инновационного аморфного металлического сплава в качестве нагревательного элемента для внутреннего и внешнего обогрева [2, 3].

Особенностью аморфных сплавов является отсутствие у них дальнего порядка в расположении атомов (трансляционная симметрия). Структура аморфных магнетных сплавов характеризуется отсутствием у них в строгой периодичности, присущей кристаллическому строению, в расположении атомов ионов молекул на протяжении сотен и тысяч периодов параметров кристаллической решетки. Считается, что отсутствие дальнего порядка в расположении атомов в аморфном состоянии приводит к изотропии магнитных свойств [1].



Рисунок 1 – Система антиобледенения кровли (пример)..

В аморфных сплавах отсутствуют такие специфические для кристаллических тел дефекты атомной структуры, как дислокации и вакансии, границы зерен и блоков, двойники и дефекты упаковки [4].

Всем аморфным сплавам, независимо от их состава, присущи высокие прочностные свойства, высокое удельное электросопротивление и повышенная стойкость к воздействию облучения (Табл. 1). В зависимости от природы компонентов аморфные сплавы могут обладать прекрасными функциональными свойствами, которыми определяется их практическое использование. Аморфные сплавы – это и магнитно-мягкие материалы, обладающие гистерезисными магнитными свойствами, уровень которых близок для лучших кристаллических магнитно-мягких материалов; это и материалы с высокой прочностью и коррозионной стойкостью; это и материалы с инварными и элинварными

свойствами; это и материалы с особыми электрическими свойствами. Аморфные сплавы уже прочно заняли свою нишу и в производстве, и в применении. Основная масса производимых аморфных сплавов используется в качестве электротехнических материалов для различного рода трансформаторов и других устройств, где они применяются как магнитопроводы. Обладая почти идеальной фазово-структурной однородностью и высоким удельным электрическим сопротивлением, аморфные сплавы имеют чрезвычайно низкие потери на перемагничивание, что и предопределяет их применение как электротехнических материалов [4].

Сегодня нагревательные элементы на основе аморфной металлической ленты все более и более широко используются в системах обогрева и антиобледенения [5,6,7].

Таблица 1

Характеристики аморфной металлической ленты

Параметры	Значение	Примечания
Толщина ленты	18-25 μm	
Ширина ленты	4-25 мм	
Удельное электрическое сопротивление	$1.3-1.5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	
Рабочее напряжение	12- 600 В	
Коррозионная стойкость	Высокая	Благодаря особому составу сплава
Пластичность и гибкость	Высокая	Благодаря особому составу сплава
Площадь прогревания	Высокая	Благодаря широкой поверхности ленты
Тепловая инерция	Низкая	Благодаря низкой массе ленты
Время на разогрев до стабильного состояния	Короткое	Благодаря низкой тепловой инерции
Применение	Системы внутреннего и внешнего обогрева	

Низкая рабочая температура

Теплопередача от любого нагревательного элемента находится в пропорциональной зависимости от площади поверхности и разницы температур между нагревателем и окружающей средой. Чем больше площадь поверхности, тем меньшая разница температур требуется для теплопередачи от нагревателя в окружающую среду. По сравнению с обычным кабелем, применяемым в большинстве нагревателей, лента, за счет относительно большой поверхности, отдает тепло в окружающую среду на низких температурах намного эффективнее. Например, если сравнить два нагревателя, из которых первый – кабельный элемент диаметром 0,5 мм, а второй – аморфная металлическая лента шириной 10 мм, с одинаковой тепловой мощностью, можно заметить, что рабочие температуры значительно разнятся. Температура ленты в 12 раз ниже температуры обычного кабельного элемента [4].

Фактически это означает, что большая площадь теплопередачи ленты позволяет достигать такой же тепловой мощности (как и у стандартного кабеля) при низких рабочих температурах нагревательного элемента.

Эффективность теплопередачи

Сравнение температур аморфной металлической ленты и обычного кабеля одинаковой тепловой мощности было произведено по следующим параметрам:

1. Длина ленты/кабеля = 1 метр.
2. Толщина ленты = 20 мкм.
3. Сопротивление сравниваемых элементов = $1,4 \times 10^{-6}$ Ом на метр.
4. Коэффициент теплопроводности сравниваемых элементов = $5,6 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$.
5. Разница температур на поверхности ленты/кабеля и окружающего воздуха составляет 100 °C .
6. Условия охлаждения – естественная конвекция.

Таблица 2

Расчет коэффициента разницы температур нагревательного кабеля к ленте

Поперечное сечение, $\text{м}^2 \cdot 10^{-6}$	Диаметр кабеля, $\text{м} \cdot 10^{-3}$	Ширина ленты, $\text{м} \cdot 10^{-3}$	Поверхность теплопередачи на единицу длины, $\text{м}^2/\text{м} \cdot 10^{-6}$ Кабель	Поверхность теплопередачи на единицу длины, $\text{м}^2/\text{м} \cdot 10^{-6}$ Ленты	Коэффициент разницы температур кабеля к ленте ¹
0.0177	0.15	0.885	0.471	1.77	3.76
0.0310	0.20	1.550	0.625	3.10	4.89
0.0490	0.25	2.450	0.785	4.90	6.25
0.0710	0.30	3.550	0.942	7.10	7.54
0.0960	0.35	4.800	1.100	9.60	8.73
0.1260	0.40	6.300	1.260	12.60	10.00
0.1960	0.50	9.800	1.570	19.60	12.47

¹ Под «разницей температур» понимается разница между температурой поверхности нагревателя и температурой воздуха.

Итоги, полученные из вышеуказанной таблицы:

1. Большая площадь теплопередачи ленты производит такую же нагревательную мощность при более низкой температуре, чем кабель.
2. Эффективность нагрева ленты значительно больше, чем эффективность нагрева кабеля.

Тепловая инерция

Аморфная металлическая лента имеет очень низкую тепловую инерцию за счет низкой массы ленты. Благодаря такому свойству лента нагревается до 30°C через 3 минуты после включения, в то время как кабель достигает той же температуры через 10 минут работы (что в три раза медленнее) (Рис. 2).

Энергопотребление

Распространение тепла от нагревательного элемента в окружающую среду производится по следующему алгоритму: поступающая энергия нагревает сам нагревательный элемент, а затем электрическую изоляцию, после чего нагревательный элемент греет окружающее пространство.

В каждом случае масса нагреваемой поверхности значительно больше массы нагревательного элемента (ленты

или кабеля). Время выхода на рабочую температуру зависит от массы поверхности и не зависит от массы нагревательного элемента. Это означает, что экономия энергопотребления имеет место быть только в процессе, пока нагревательный элемент достигает определенной температуры [8,9].

Благодаря тому, что аморфная металлическая лента очень тонкая, она обладает очень низкой массой. В результате нагревание до требуемой температуры проходит очень быстро, а потребление электроэнергии по сравнению с обычным кабелем меньше. Кроме того, фактическое электрическое сопротивление кабеля в большинстве случаев намного меньше, чем у аморфной ленты. В результате, требуется кабель большей массы для обеспечения такого же электрического сопротивления (одинаковое электрическое сопротивление обеспечивает одинаковую мощность для сравниваемых нагревательных элементов) [5].

Для того, чтобы понять, сколько требуется энергии для прогрева самого нагревательного элемента, давайте произведем расчет на 1 кВт электроэнергии для аморфной металлической ленты и кабеля по следующим геометрическим параметрам (мощность 220 В) (Табл. 3)

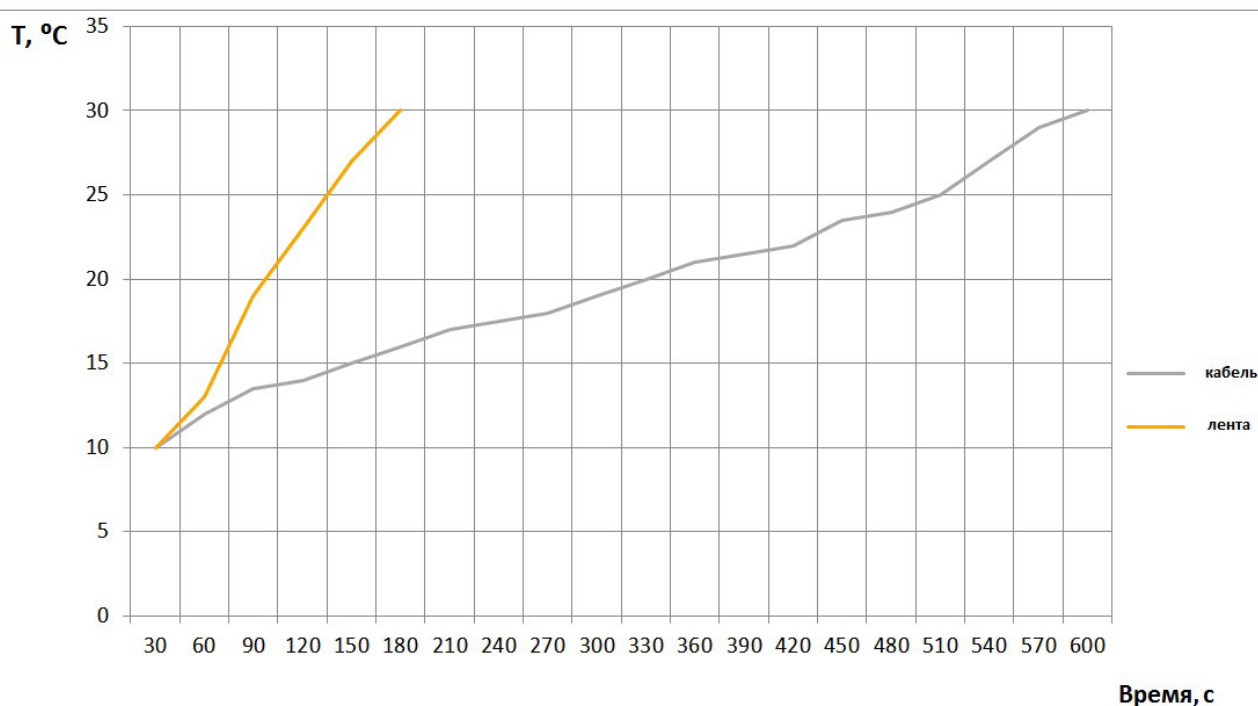


Рисунок 2 – График изменения температуры нагревательной ленты и кабеля после включения.

Таблица 3

Параметры сравниваемых нагревательной ленты и кабеля

Аморфная лента	Кабель
толщина 25 $\mu\text{м}$ ширина 25 мм	диаметр 1 мм
длина 21.6 м	длина 70 м
электрическое сопротивление $1.4 \times 10^{-6} \text{ Ом*м}$	электрическое сопротивление $0.54 \times 10^{-6} \text{ Ом*м}$

Для увеличения температуры кабеля на 2°C требуется электроэнергия в 0,00016 кВт·ч. Масса ленты в таком случае меньше в 4 раза. Это означает, что электроэнергии для нагрева ленты в таких же условиях понадобится 0,00004 кВт·ч (Рис. 3).

Необходимо отметить, что у кабеля больше изолирующего материала, чем у ленты. Это еще больше увеличивает затраты на нагрев кабеля по сравнению с лентой.

Исходя из вышеизложенного, нагревательная лента гораздо более эффективна, чем кабель. Потребление электроэнергии у ленты в 2-4 раза ниже, чем у кабеля. Это дает множество возможностей для экономии электроэнергии при работе нагревателей в циклическом режиме.

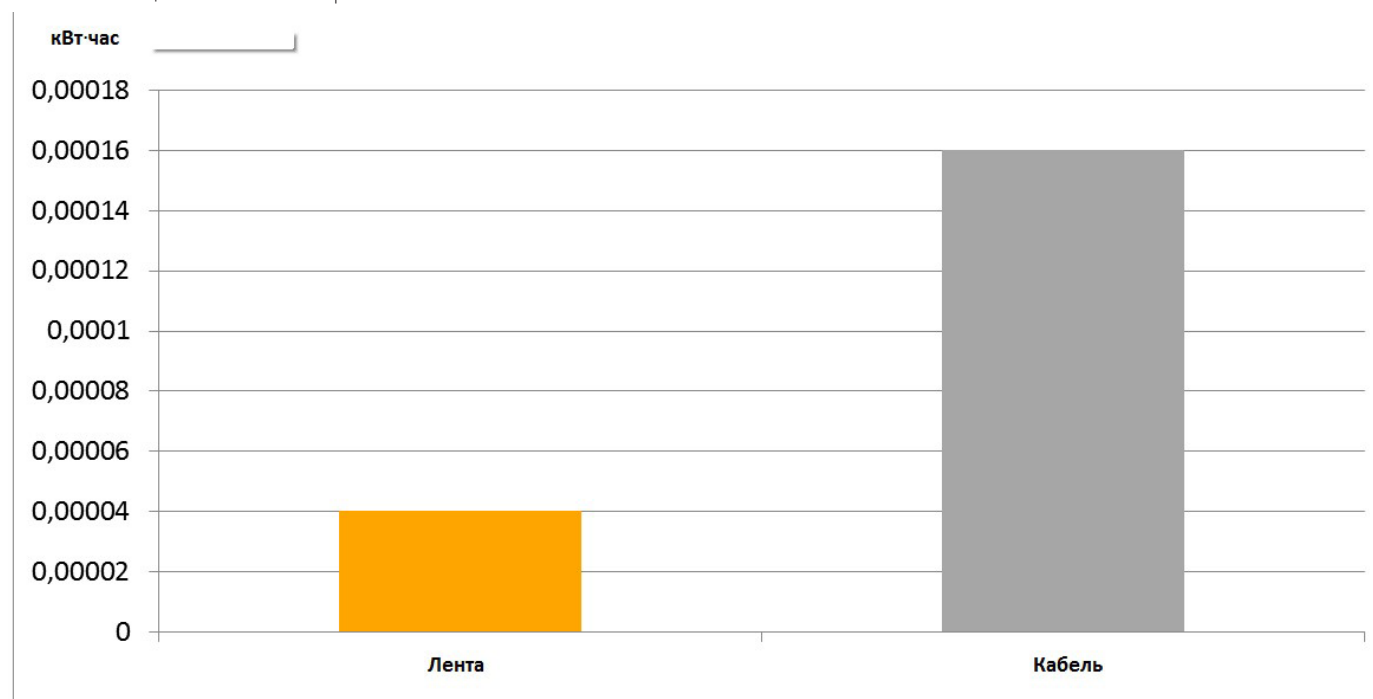


Рисунок 3 – Количество электроэнергии, требуемое нагревательной ленте и кабелю для нагрева на 2°C

Экологичность

Благодаря значительно более низкой рабочей температуре аморфной ленты, в сравнении с кабелем, системы на основе аморфной ленты гораздо более экологичны: пыль на поверхности нагревателей не сгорает, как это происходит с высокотемпературными нагревательными элементами. Более низкая температура означает более здоровое окружение, повышенную безопасность и продолжительную работоспособность.

Измерения силы магнитного поля аморфной металлической ленты показали, что оно крайне низкое [7]. На расстоянии 10 мм от нагревательного элемента сила магнитного поля меньше трети магнитного поля Земли (которая составляет $\sim 420 \text{ мГн}$) и практически полностью создается чуть выше.

Безопасность

Технология системы обогрева, в основе которых лежит аморфная металлическая лента, исключает риск каких-либо повреждений поверхностей, к которым или на которые они устанавливаются (в отличие от других систем, работающих на значительно более высоких температурах).

Заключения:

1. Аморфная металлическая лента может быть использована как низкотемпературный нагревательный элемент.
2. Низкотемпературный нагревательный элемент на основе аморфной металлической ленты экологичный и безопасный.
3. Аморфная металлическая лента обладает очень низкой тепловой инерцией и достигает стабильного температурного состояния за относительно короткое время.
4. Тепловая эффективность ленты значительно выше, чем у кабеля. Большая площадь поверхности теплопередачи ленты позволяет достигать такой же тепловой мощности (как при использовании обычного кабеля) на более низких рабочих температурах нагревательного элемента.
5. Ультратонкая лента с большой площадью поверхности предотвращает поглощение тепла металлом и делает теплопередачу эффективнее.
6. Существенная экономия энергии рассчитывается за счет низкой тепловой инерции и эффективной теплопередачи, особенно в режиме быстрого переключения (вкл/выкл).
7. Высокая механическая прочность, низкая температура нагрева и коррозионная устойчивость наделяют ленту высокой степенью надежности, что особенно важно при эксплуатации антиобледенительных систем в экстремальных условиях арктических территорий.

Список литературы:

1. Павленко Т.П., Токарь М.Н. Анализ и исследование свойств аморфных сплавов // Электротехника и электромеханика. 2013. № 5. С. 45-47. Статья в журнале.
2. Patent № 5,641,421, Jun. 24, 1997 (United States Patent) «Amorphous metallic alloy electrical heater systems»: [<https://patents.google.com/patent/US5641421A/en>]
3. Patent № EP 0 808 078 B1, 04.10.2001 (European Patent Office) «Amorphous metallic alloy electrical heater system»: [<https://data.epo.org/publication-server/document?cc=EP&pn=0808078&ki=B1&lg=en>]
4. Могильников П.С. Закономерности влияния процессов структурной релаксации на магнитные свойства и механическое поведение аморфных сплавов на основе кобальта с очень низкой магнитострикцией ($\lambda_s < 10^{-7}$): диссертация канд. физико-математических наук. 01.04.07 / Павел Сергеевич Могильников. Москва, 2016. 202с.
5. Brook-Levinson E.T., Geller M.A Amorphous metallic alloy ribbons heating element // The optimization of composition, structure and properties of metals, oxides, composites, nano- and amorphous materials. 2003. p. 80-88.
6. Geller M. Electric wires and ribbon heating elements for under floor heating: [<http://www.orionecotech.com/pdf/Wire-ribbon%20energy%20consumption.pdf>]
7. Test Report №: 221968 – EN 62233, Nemko testing laboratory. 2008: [http://2.ahtrussia.z8.ru/wp-content/uploads/2015/07/Nemko_2.png]
8. Измайлов С.В., Шульга А.Р., Шульга Р.Н., Змиева К.А. Новые подходы к созданию энергоинформационных распределительных сетей // Электротехника. № 2. 2014. С. 39-43.
9. Змиева К.А. Применение автоматических компенсаторов реактивной мощности для повышения энергоэффективности управления электроприводом металлообрабатывающих станков // Электротехника. 2009. № 11. С. 26-32.

References:

1. Pavlenko T.P., Tokar' M.N. Analiz i issledovanie svojstv amorfnyh splavov // Elektrotekhnika i elektromekhanika. 2013. № 5. S. 45-47.
2. Patent № 5,641,421, Jun. 24, 1997 (United States Patent) «Amorphous metallic alloy electrical heater systems»: [<https://patents.google.com/patent/US5641421A/en>]
3. Patent № EP 0 808 078 B1, 04.10.2001 (European Patent Office) «Amorphous metallic alloy electrical heater system»: [<https://data.epo.org/publication-server/document?cc=EP&pn=0808078&ki=B1&lg=en>]
4. Mogil'nikov P.S. Zakonomernosti vliyaniya processov strukturnoj relaksacii na magnitnye svojstva i mekhanicheskoe povedenie amorfnyh splavov na osnove kobal'ta s ochen' nizkoj magnitostrikiej ($\lambda_s < 10^{-7}$): dissertaciya kand. fiziko-matematicheskikh nauk. 01.04.07 / Pavel Sergeevich Mogil'nikov. Moskva, 2016. 202s.
5. Brook-Levinson E.T., Geller M.A Amorphous

- metallic alloy ribbons heating element // The optimization of composition, structure and properties of metals, oxides, composites, nano- and amorphous materials. 2003. p. 80-88.
6. Geller M. Electric wires and ribbon heating elements for under floor heating: [<http://www.orionecotech.com/pdf/Wire-ribbon%20energy%20consumption.pdf>]
 7. Test Report №: 221968 – EN 62233, Nemko testing laboratory. 2008: [http://2.ahtrussia.z8.ru/wp-content/uploads/2015/07/Nemko_2.png]
 8. Izmailov S.V., ShulGa R.N., ShulGa A.R., Zmieva K.A. New approaches to the creation of energy information distribution networks // Russian Electrical Engineering. 2014. T. 85. № 2. C. 100-104.
 9. Zmieva K.A. Methods for using automatic compensators for reactive power to increase power efficiency of electric drive control in metal removal machine tools // Russian Electrical Engineering. 2009. T. 80. № 11. C. 604-609.

«Российская Арктика» – научный рецензируемый журнал, который издается с 2018 года в электронном виде. Издание выходит на русском и английском языках.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-72859 от 22 мая 2018 года.

Номер ISSN: 2658-4255

Задачи журнала:

- предоставить ученым, занимающимся изучением Арктики, возможность оперативно публиковать результаты своих исследований;
- обеспечить научное сопровождение стратегически важных проектов в Арктике;
- привлечь внимание широкой аудитории к проблемам здравоохранения коренного населения, экологии и климата русского Севера;
- предоставить российским и иностранным ученым площадку для диалога и обмена знаниями;
- повысить престиж научных исследований российских ученых на мировом уровне.

Тематики

К публикации принимаются научные работы по следующим дисциплинам:

- 03.02.00 Общая биология
- 03.03.00 Физиология
- 05.22.00 Транспорт
- 05.14.00 Энергетика
- 25.00.00 Науки о Земле

Периодичность

Журнал выходит 4 раза в год; по запросу публикуются тематические и специальные выпуски.