

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

УДК 621.3

**ВЫБРОСЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОИЗВОДСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ,  
И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ***Н.Э. Соболев, А.В. Крупнов**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Соболев Н.Э., Крупнов А.В., 2022

**Аннотация.** В статье исследована текущая ситуация с энергетикой в России и ее возможные перспективы, установлены процентные доли каждого источника генерации в стране и их соотношения. Проанализированы и посчитаны выбросы ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{VOC}_s$ ) для каждого типа электростанций, установлена их взаимосвязь и общее количество на каждый киловатт-час произведенной электроэнергии (453 г  $\text{CO}_2$ , 1 мг  $\text{SO}_2$ , 0,83 мг  $\text{NO}_x$ , 0,07 мг  $\text{PM}_{2,5}$ , 0,053 мг  $\text{VOC}_s$ ). Приведено сравнение разных стран по выбросам углекислого газа и показано, что Россия занимает четвертое место. Выявлено, что по производству электроэнергии Россия также находится на четвертом месте в мире, а для перехода России к устойчивому энергетическому будущему необходима декарбонизация электроэнергетической генерации.

**Ключевые слова:** энергетика, зеленая энергия, возобновляемые источники энергии, выбросы, парниковый эффект, типы электростанций в России, декарбонизация, электроэнергия.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2022-39-50****ВВЕДЕНИЕ**

Использование электромобилей значительно увеличилось за последние годы: в 2012 г. было продано 12 тыс. электромобилей, в 2015 г. – 430 тыс., а в 2020 г. – 3,24 млн. Электромобиль рекламируется как потенциальное решение проблемы антропогенного изменения климата. Также существует мнение, что электромобили, работающие от сети с текущим процентом возобновляемой энергетики, для экологии хуже автомобилей с двигателем внутреннего сгорания [1]. У каждой из версий есть свои сторонники, но никто не учитывает, что текущее производство электроэнергии связано с огромными выбросами в окружающую среду. Однако ситуацию можно исправить, если увеличить долю низкоуглеродистых возобновляемых источников энергии. В связи с этим необходимо рассмотреть текущую ситуацию с энергетикой в России и возможными положительными изменениями в ней и выяснить, какое потенциальное влияние на данную ситуацию могут оказать электромобили.

**ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РОССИИ**

Не всегда новости, связанные с электромобилями, положительны. Некоторые эксперты указывают на высокие цены и ограниченный ассортимент товара, но с каждым годом появляется все больше новых моделей. Разнообразные варианты электромобилей становятся дешевле, ассортимент постепенно расширяется. В целом электромобили демонстрируют рост производства каждый год. В связи с этим появляется серьезная проблема выбросов в процессе производства электроэнергии. Выработка последней будет напрямую зависеть от количества электромобилей.

Рассмотрим более подробно вопрос генерации и выбросов различных загрязняющих веществ. В табл. 1 приведено производство электроэнергии по типам генерации [6, 8].

*Таблица 1*

Установленная мощность электростанций России по видам генерации

Тип электростанций	Доля в установленной мощности, %
Ветровые	0,61
Солнечные	0,72
Гидроэлектростанции (ГЭС)	20,21
Геотермальные	0,03
Биомасса	0,62
Общее количество возобновляемой энергетики (без учета ГЭС)	1,98
Тепловые электростанции (ТЭС) на мазуте	9,60
ТЭС на природном газе	35,50
ТЭС на угле	21,00
Атомные	12,36
Общее количество невозобновляемой энергетики	78,46

Анализ производства энергии в России показывает, что выбросы парниковых газов на киловатт-час сильно варьируются от региона к региону (по данным Федеральной службы по надзору в сфере природопользования за 2020 г.) [5]. Таким образом, необходимо увеличение генерации в уже достаточно «экологически загруженных» регионах. Следовательно, истинная «экологичность» электромобилей заключается не в ее нынешнем состоянии, а в том, чем она может стать, если увеличить число возобновляемых источников энергии. Современный электромобиль следует рассматривать не как готовый продукт, а как средство, способствующее позитивным изменениям. Далее рассмотрим выбросы от текущей энергосистемы.

**МОДЕЛЬ СООТНОШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ  
ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

В рассматриваемой нами модели процент ГЭС поддерживается на одном уровне, поскольку нелогично предполагать, что количество ГЭС будет увеличиваться пропорционально остальным технологиям использования возобновляемых источников энергии. Гидроэнергетика останется почти неизменной в 2021–2040 гг. из-за ограниченных ресурсов и экономических затрат на строительство новых плотин. При этом все остальные виды выработки электроэнергии будут увеличиваться пропорционально друг другу с течением времени. Такой вывод был получен путем определения процентной доли

каждого источника энергии, соответствующей процентной доле возобновляемой или невозобновляемой энергии (табл. 2) [3].

Таблица 2

## Соотношение возобновляемой энергетики России

Вид генерации	Процентное соотношение (между собой), %
Ветровая	2,74
Солнечная	3,24
ГЭС	91,07
Геотермальная	0,13
Биомасса	2,79

В связи с тем, что процент гидроэнергетики будет оставаться постоянным, ГЭС была исключена из расчета, а другие виды производства возобновляемой энергии (ветровая, солнечная, геотермальная и биомасса) разделены на общий процент для негидроэлектрической возобновляемой энергии для определения их относительной доли (табл. 3).

Таблица 3

## Соотношение возобновляемой энергетики России без ГЭС

Вид генерации	Процентное соотношение (между собой), %
Ветровая	30,78
Солнечная	36,40
Геотермальная	1,46
Биомасса	31,34

Проценты в табл. 3 использовались для прогнозирования каждого возможного сценария использования возобновляемых источников энергии. Это было достигнуто путем деления относительного процента (ОП) из табл. 2 на разность процента возобновляемой энергии (ВЭ) и процента гидроэнергетики (ГЭС) в табл. 3:

$$\text{Процент возобновляемой энергетики} = \text{ОП} / (\text{ВЭ} - \text{ГЭС}).$$

Аналогичным образом был произведен расчет для невозобновляемых источников энергии по данным из табл. 1: процентное соотношение для каждого невозобновляемого источника энергии (нефти, природного газа, угля и ядерной энергии) было разделено на общий процент невозобновляемых источников энергии для количественной оценки их относительной доли (табл. 4).

$$\text{Процент невозобновляемой энергетики} = \text{ОП} / (100 - \text{ВЭ}).$$

Таблица 4

## Соотношение невозобновляемой энергетики России

Вид генерации	Процентное соотношение (между собой), %
ТЭС на мазуте	12,23
ТЭС на природном газе	45,24
ТЭС на угле	26,76
Атомные	15,75

## ВЫБРОСЫ ОТ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Выбросы от электростанций рассматривались с точки зрения оценки времени службы. Это особенно важно для возобновляемых источников энергии, поскольку предельные выбросы от солнечных, концентрационных солнечных электростанций и гидроэнергетики приближаются к нулю. Высоко оцененная программа оценки жизненного цикла Аргоннской национальной лаборатории GREET 2020 использовалась для определения выбросов в расчете на киловатт-час для угля (рис. 1), природного газа, нефти, атомных электростанций и электростанций на биомассе [14].

The screenshot shows the results for 'Non Distributed - Coal Electricity Mix' with an output of 'Electricity' per '1 kWh' for the target year '2019'. The emissions are listed as follows:

Category	Value
Well to Use	---
Emissions	---
CO2 Total	9.63e-4 t
CO2	9.63e-4 t
CO2_Biogenic	-2.64e-8 t
VOC	7.95e-8 t
CO	8.29e-8 t
NOx	4.88e-7 t
PM10	1.44e-7 t
PM2.5	5.66e-8 t
SOx	2.41e-6 t
CH4	1.41e-6 t
N2O	1.53e-8 t
BC	2.68e-9 t
POC	6.02e-9 t

Рис. 1. Выбросы в расчете на киловатт-час для загрязняющих веществ

Данные из GREET 2020 отображают информацию о выбросах в расчете на киловатт-час для загрязняющих веществ, подробно описанных в этом исследовании.

Программа GREET 2015 не предоставляет данные о выбросах LCA (Life Cycle Assessment – оценка жизненного цикла) для других электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии. Чтобы собрать данные о выбросах для фотоэлектрических, концентрационных солнечных электростанций, геотермальных и гидроэлектростанций, использовали метаанализ данных комитета ООН по устойчивой энергетике. В статье представлены данные метаанализа для CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и твердых частиц по каждому виду производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии. В каждом случае было зарегистрировано среднее/номинальное значение (табл. 5) [14].

В метаанализ не входили данные, связанные с летучими органическими веществами, эту информацию необходимо было получить из сравнения жизненного цикла энергетических технологий (Skone, Littlefield, Cooney, & Marriott, 2013) и отчета о проекте NEED [16].

Данные, представленные в табл. 6–10 и на рис. 2 и 3, основаны на информации из табл. 5 и пересчитаны для Тверской области по каждому виду выброса загрязняющего вещества. Потребление электроэнергии Тверской областью в 2021 г. за период январь-июль составило 4 971,6 млн кВт·ч [11], следовательно, среднее значение потребления электроэнергии в сутки для Тверской области будет 27,62 млн кВт·ч.

Таблица 5

## Выбросы от электростанций по видам генерации

Вид генерации	CO <sub>2</sub> , г	SO <sub>2</sub> , г	NO <sub>x</sub> , г	PM <sub>2,5</sub> , г	VOC <sub>s</sub> , г
Ветровая	11	0,046	0,043	0,008	0,008 81
Солнечная	48	0,307	0,178	0,308	0,088
ГЭС	7	0,035	0,008	0,013	0,000 016
Геотермальная	58	0,08	0,025	0,026	0,000 442
Биомасса	30,783 54	0,657 94	1,063 12	0,612 02	0,149 84
ТЭС на мазуте	942,039 24	3,082 52	4,301 14	0,133 67	0,074 18
ТЭС на природном газе	444,400 70	0,095 01	0,413 17	0,013 61	0,072 94
ТЭС на угле	962,930 24	3,121 23	1,235 44	0,210 81	0,086 82
Атомная	10,482 54	0,020 19	0,025 30	0,001 90	0,003 74
Итого	2 549,636 27	7,486 90	7,399 17	1,344 01	0,522 39

Примечание. CO<sub>2</sub> – углекислый газ; SO<sub>2</sub> – оксид серы; NO<sub>x</sub> – оксиды азота; PM<sub>2,5</sub> – мелкодисперсные частицы (кусочки сажи, асфальта, минеральных солей, оксиды азота и серы); VOC<sub>s</sub> – летучие органические вещества.

Приведенное значение выброса, например углекислого газа:

$$CO_{2*} = CO_2 \cdot \text{Доля генерации в производстве, г/кВт}\cdot\text{ч.}$$

Средние значения выбросов от потребления электроэнергии в Тверской области:

Средние значения выбросов за сутки = CO<sub>2\*</sub> · Среднее значение потребления за сутки, г.

Таблица 6

## Выбросы углекислого газа

Вид генерации	Доля в производстве от всей генерации, %	CO <sub>2</sub> , г/кВт·ч	CO <sub>2*</sub> , г/кВт·ч	Средние выбросы от потребления Тверской области в сутки, г*
Ветровая	0,61	11	0,067 1	1 409 100
Солнечная	0,72	48	0,345 6	7 257 600
ГЭС	20,21	7	1,414 7	29 708 700
Геотермальная	0,03	58	0,017 4	365 400
Биомасса	0,62	30,78	0,190 836	4 007 556
Нефтяная	9,60	942,04	90,435 84	1 899 152 640
ТЭС на природном газе	35,50	444,40	157,762	3 313 002 000
Угольная	21,00	962,93	202,215 3	4 246 521 300
Атомная	12,36	10,48	1,295 328	27 201 888
Сумма	–	2 514,64	453,744 104	9 528 626 184

\*Усредненное значение при потреблении 27 620 000 кВт·ч.

Таблица 7

## Выбросы оксида серы

Вид генерации	Доля в производстве от всей генерации, %	SO <sub>2</sub> , мг/кВт·ч	SO <sub>2</sub> *, мг/кВт·ч	Средние выбросы от потребления Тверской области в сутки, мг
Ветровая	0,61	0,046	0,0 002 806	5 892,6
Солнечная	0,72	0,307	0,0 022 104	46 418,4
ГЭС	20,21	0,035	0,0 070 735	148 543,5
Геотермальная	0,03	0,08	0,000 024	504
Биомасса	0,62	0,658	0,0 040 796	85 671,6
Нефтяная	9,60	3,083	0,295 968	6 215 328
ТЭС на природном газе	35,50	0,095	0,033 725	708 225
Угольная	21,00	3,121	0,65 541	13 763 610
Атомная	12,36	0,020	0,002 472	51 912
Сумма	–	7,49	1,0 012 431	21 026 105,1

Таблица 8

## Выбросы оксидов азота

Вид генерации	Доля в производстве от всей генерации, %	NO <sub>x</sub> , мг/кВт·ч	NO <sub>x</sub> *, мг/кВт·ч	Средние выбросы от потребления Тверской области в сутки, мг
Ветровая	0,62	43	0,266 6	7 363 492
Солнечная	0,72	178	1,281 6	35 397 792
ГЭС	20,21	8	1,616 8	44 656 016
Геотермальная	0,03	25	0,007 5	207 150
Биомасса	0	760	0	0
ТЭС на мазуте	2,680 1	3 890	104,256	2 879 547 682
ТЭС на природном газе	47,790 3	298	142,415	3 933 504 896
ТЭС на угле	15,599 6	760	118,557	3 274 543 235
Атомная	12,36	11	1,359 6	37 552 152
Сумма	–	5 973	369,76	10 212 772 415

Таблица 9

## Выбросы мелкодисперсных частиц

Вид генерации	Доля в производстве от всей генерации, %	PM <sub>2,5</sub> , мг/кВт·ч	PM <sub>2,5</sub> *, мг/кВт·ч	Средние выбросы от потребления Тверской области в сутки, мг
Ветровая	0,62	8	0,049 6	1 369 952
Солнечная	0,72	308	2,217 6	61 250 112
ГЭС	20,21	13	2,627 3	72 566 026
Геотермальная	0,03	26	0,007 8	215 436

Окончание табл. 9

Вид генерации	Доля в производстве от всей генерации, %	PM <sub>2,5</sub> , мг/кВт·ч	PM <sub>2,5*</sub> , мг/кВт·ч	Средние выбросы от потребления Тверской области в сутки, мг
Биомасса	0	78	0	0
ТЭС на мазуте	2,680 1	229	6,137 43	169 515 789
ТЭС на природном газе	47,790 3	23	10,991 8	303 592 659,8
ТЭС на угле	15,599 6	70	10,919 7	301 602 666,4
Атомная	12,36	0,5	0,061 8	1 706 916
Сумма	–	755,5	33,013	911 819 557,2

Таблица 10

## Выбросы летучих органических веществ

Вид генерации	Доля в производстве от всей генерации, %	VOC <sub>s</sub> , мг/кВт·ч	VOC <sub>s*</sub> , мг/кВт·ч	Средние выбросы от потребления Тверской области в сутки, мг
Ветровая	0,62	8,81	0,054 62	1 508 659,64
Солнечная	0,72	88	0,633 6	17 500 032
ГЭС	20,21	0,016	0,003 23	89 312,032
Геотермальная	0,03	0,442	0,000 13	3 662,412
Биомасса	0	40	0	0
ТЭС на мазуте	2,680 1	155	4,154 16	114 737 761,1
ТЭС на природном газе	47,790 3	69	32,975 3	910 777 979,3
ТЭС на угле	15,599 6	86	13,415 7	370 540 418,7
Атомная	12,36	2,9	0,358 44	9 900 112,8
Сумма	–	450,168	51,595 1	1 425 057 938

Рис. 2. Соотношение выбросов между собой без учета CO<sub>2</sub>

Для наглядности сравним выбросы  $\text{CO}_2$  в разных странах за 2018 г. (рис. 3) [12].

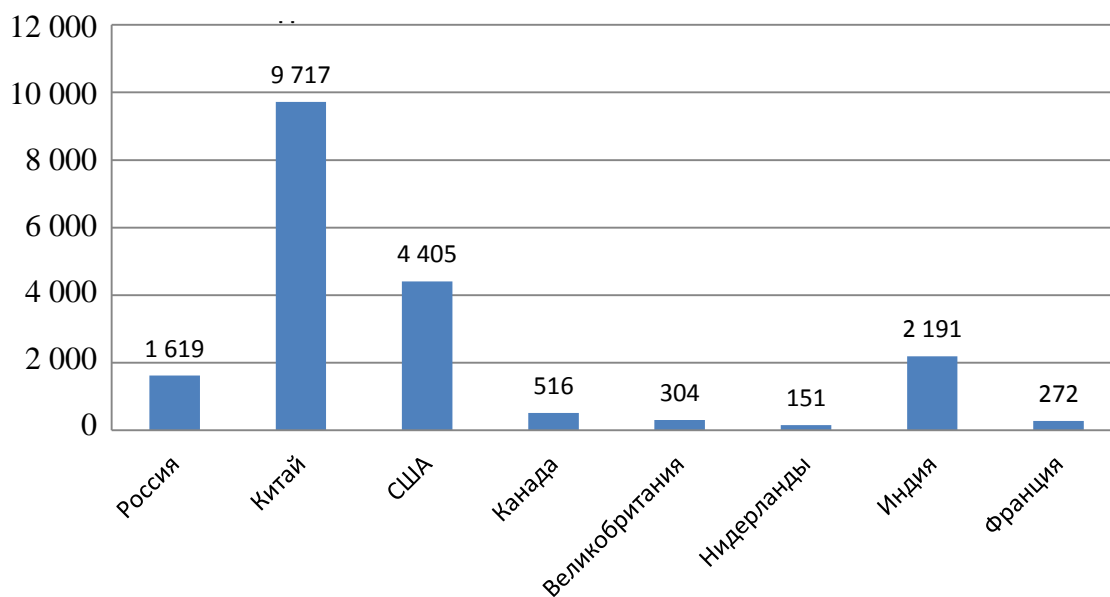


Рис. 3. Выбросы  $\text{CO}_2$  в разных странах (млн тонн в год)

Россия находится на четвертом месте по мировой выработке электроэнергии. Большой процент ГЭС, станций на природном газе, угле, мазуте и атомной генерации составляет процент выбросов углекислого газа на уровне, сопоставимом с другими странами [9].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выработка энергии возобновляемыми источниками более экологична, но в то же время дороже «традиционной». Доля возобновляемых источников энергии в России находится на очень низком уровне, и нет никаких серьезных планов по развитию зеленой энергии, однако рост популярности и более качественная разработка электромобилей могут стать толчком к позитивным изменениям в этом направлении. Соответственно, с увеличением количества возобновляемых источников уменьшится число невозобновляемых источников энергии (примерное соотношение можно увидеть на рис. 4).

Из рис. 4 видно, что уже 30 % возобновляемых источников энергии окажут существенное положительное влияние на экологию и, следовательно, значительно уменьшат количество выбросов. Таким образом, декарбонизация электроэнергетической генерации необходима для перехода к устойчивому энергетическому будущему. В ближайшие годы потребуются крупные инвестиции, однако они столкнутся с неопределенностью спроса и плановыми показателями по изменению климата. Инвестиции в низкоуглеродные технологии являются ключевыми для энергетической безопасности и уменьшения отрицательных последствий изменения климата [2].



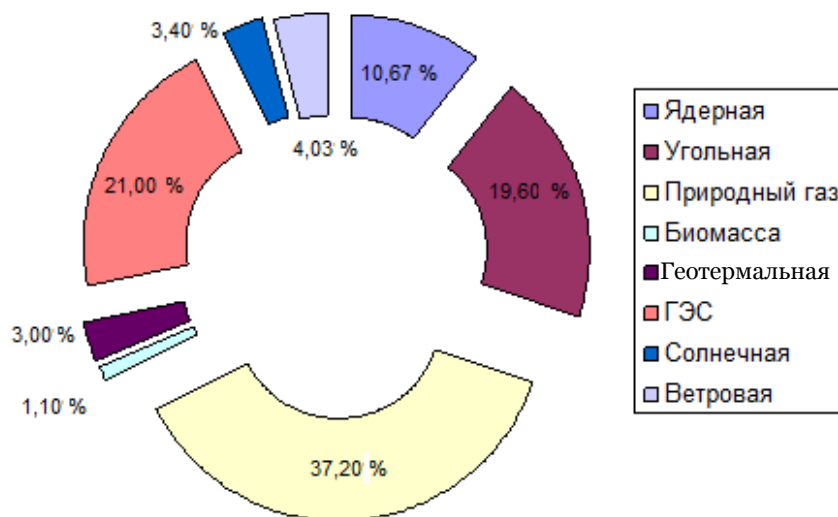


Рис. 4. Соотношение источников генерации при числе возобновляемых источников энергии, составляющем 30 %

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулова А.Ш., Штрамель А.В. Развитие «зеленой» энергетики в России: преимущества и недостатки // Инновационная наука. 2020. № 11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-zelenoy-energetiki-v-rossii-preimuschestva-i-nedostatki> (дата обращения: 30.10.2021).
2. Возобновляемая энергетика в России и других государствах ЕАЭС и СНГ: проблемы и перспективы правового регулирования / Т.В. Ефимцева, А.А. Дьяконова, Е.С. Михайлова, О.В. Рахматуллина, Р.Н. Салиева. URL: <http://www.publishing-vak.ru/file/archive-law-2019-12/11-efimtseva.pdf> (дата обращения: 30.10.2021).
3. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Экологический вызов и устойчивое развитие. М.: Прогресс-Традиция. 2000. 414 с.
4. «Зеленая» экономика. Новая парадигма развития страны / С.Н. Бобылев [и др.]; под общ. ред. А.В. Шевчука. М.: СОПС. 2015. 246 с.
5. Индикаторы работы ЕЭС/ОЭС. Генерация и потребление // СО ЕЭС. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/ees/ees-indicators/ees-gen-consump-hour/> (дата обращения: 30.10.2021).
6. Информационный обзор «Единая энергетическая система России»: промежуточные итоги (оперативные данные) // СО ЕЭС. URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/companu/reports/ups-review/2021/ups\\_review\\_0921.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/companu/reports/ups-review/2021/ups_review_0921.pdf) (дата обращения: 30.10.2021).
7. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии «РОССТАНДАРТ». URL: <https://rst.gov.ru:8443/file-service/file/load/1520858962627> (дата обращения: 30.10.2021).
8. Куашнинг Ф. Системы возобновляемых источников энергии. Технологии. Расчеты. Моделирование. Астана: Фолиант. 2013. 432 с.
9. Лебедев Ю.В., Лебедева Т.А. Зеленая энергетика: состояние и ожидания // Зеленая экономика, зеленая энергетика, зеленые инвестиции. URL: [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/61011/1/978-5-8295-0584-4\\_40.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/61011/1/978-5-8295-0584-4_40.pdf) (дата обращения: 30.10.2021).
10. Отчет по экологической безопасности Калининской АЭС за 2020 год // Росатом. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/5b3/5b3b697a00332e0553e6822e25e80d9e.pdf> (дата обращения: 30.10.2021).

11. Потребление электроэнергии в энергосистеме Тверской области // СО ЕЭС. URL: <https://www.so-ups.ru/odu-center/news/odu-center-news-view/news/16577/> (дата обращения: 30.10.2021).
12. Список стран по эмиссии CO<sub>2</sub> // Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_стран\\_по\\_эмиссии\\_CO2](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_по_эмиссии_CO2) (дата обращения: 30.10.2021).
13. Сушков В.А. Предварительные материалы по оценке воздействия на окружающую среду эксплуатации энергоблоков № 2, 3 Калининской АЭС на мощности реакторной установки 104 % от номинальной // Росэнергоатом. Удомля, Тверь: 2013. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/67e/67e7d4dcb3e3d01dfd6322652a07d03c.pdf> (дата обращения: 30.10.2021).
14. Argonne release GREET 2020 // Green car congress. URL: <https://www.greencarcongress.com/2020/10/20201010-greet.html> (дата обращения: 30.10.2021).
15. Carbon dioxide emissions from energy consumption by source // EIA GOV USA. URL: <https://www.eia.gov/environment/> (дата обращения: 30.10.2021).
16. Power generation technology comparison from a life cycle perspective (report). URL: <https://www.osti.gov/biblio/1515245> (дата обращения: 30.10.2021).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*СОБОЛЕВ Никита Эдуардович* – магистрант 2-го курса, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [n.sobolew.2021@gmail.com](mailto:n.sobolew.2021@gmail.com)

*КРУПНОВ Андрей Владимирович* – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [AV.Krupnov@yandex.ru](mailto:AV.Krupnov@yandex.ru)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Соболев Н.Э., Крупнов А.В. Выбросы, связанные с производством электроэнергии, и перспективы развития энергетики // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 1 (13). С. 39–50.

---

### EMISSIONS RELATED TO ELECTRICITY PRODUCTION AND PROSPECTS FOR ENERGY DEVELOPMENT

*N.E. Sobolev, A.V. Krupnov*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article examines the current situation with the energy sector in Russia and its possible prospects, establishes the percentages of each generation source in the country and their ratios. Emissions (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2,5</sub>, VOC<sub>s</sub>) for each type of power plants, their relationship and the total amount per kilowatt hour of electricity produced (453 g CO<sub>2</sub>, 1 mg SO<sub>2</sub>, 0,83 mg NO<sub>x</sub>, 0,07 mg PM<sub>2,5</sub>, 0,053 mg VOC<sub>s</sub>) were analyzed and calculated. The comparison of different countries in terms of carbon dioxide emissions, in which Russia ranks fourth, is given. It is revealed that Russia is also in fourth place in the world in terms of electricity production, and decarbonization of electric power generation is necessary for Russia's transition to a sustainable energy future.

**Keywords:** energy, green energy, renewable energy sources, emissions, greenhouse effect, types of power plants in Russia, decarbonization, electricity.

### REFERENCES

1. Akulova A.Sh., Shtramel A.V. Development of «green» energy in Russia: advantages and disadvantages // *Innovacionnaya nauka*. 2020. No. 11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-zelenoy-energetiki-v-rossii-preimuschestva-i-nedostatki> (date of access: 30.10.2021). (In Russian).
2. Renewable energy in Russia and other EAEU and CIS states: problems and prospects of legal regulation / T.V. Efimtseva, A.A. Dyakonova, E.S. Mikhailova, O.V. Rakhmatullina, R.N. Salieva. URL: <http://www.publishing-vak.ru/file/archive-law-2019-12/11-efimtseva.pdf> (date of access: 30.10.2021). (In Russian).
3. Danilov-Danilyan V.I., Losev K.S. *Ecologicheskii vyzov i ustoichivoe razvitie* [Ecological challenge and sustainable development]. Moscow: Progress-Tradiciya. 2000. 414 p.
4. «Zelyonaya ekonomika». *Novaya paradigma razviviya strany* [«Green» economy. A new paradigm of the country's development] / Bobylev S.N. [et al.]; under the general editorship of A.V. Shevchuk. Moscow: SOPS. 2015. 246 p. (In Russian).
5. Indicators of the work of the EEC / ECO. Generation and consumption // SO UPS. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/ees/ees-indicators/ees-gen-consump-hour/> (date of access: 30.10.2021). (In Russian).
6. Information review «Unified Energy System of Russia»: interim results (operational data) // SO UPS. URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2021/ups\\_review\\_0921.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2021/ups_review_0921.pdf) (date of access: 30.10.2021). (In Russian).
7. Information and technical reference book on transitional technologies ITS 38-2017. Combustion of fuel at large installations in the field of energy production // Federal Agency for Technical Regulation and Metrology «ROSSTANDART». URL: <https://rst.gov.ru:8443/file-service/file/load/1520858962627> (date of access: 30.10.2021). (In Russian).
8. Kuashning F. *Systemy vozobnovlyaemuh istochnikov energii* [Renewable energy systems. Technologies. Calculations. Modeling]. Astana: Foliant. 2013. 432 p. (In Russian).
9. Lebedev Yu.V., Lebedeva T.A. Green energy: state and expectations // Green economy, green energy, green investments. URL: [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/61011/1/978-5-8295-0584-4\\_40.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/61011/1/978-5-8295-0584-4_40.pdf) (date of access: 30.10.2021). (In Russian).
10. Report on environmental safety of Kalinin NPP for 2020 // Rosatom. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/5b3/5b3b697a00332e0553e6822e25e80d9e.pdf> (date of access: 30.10.2021). (In Russian).
11. Electricity consumption in the power system of the Tver region // SO UPS. URL: <https://www.so-ups.ru/odu-center/news/odu-center-news-view/news/16577/> (date of access: 30.10.2021). (In Russian).
12. List of countries by carbon dioxide emissions // Wikipedia. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_стран\\_по\\_эмиссии\\_CO2](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_по_эмиссии_CO2) (date of access: 30.10.2021). (In Russian).
13. Sushkov V.A. Preliminary materials on the environmental impact assessment of the operation of power units No. 2, 3 of the Kalinin NPP at the reactor plant capacity of 104 % of the nominal // Rosenergoatom. Udomlya, Tver: 2013. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/67e/67e7d4dcb3e3d01dfd6322652a07d03c.pdf> (date of access: 30.10.2021). (In Russian).
14. Argonne release GREET 2020 // Green car congress. URL: <https://www.greencarcongress.com/2020/10/20201010-greet.html> (date of access: 30.10.2021).

15. Carbon dioxide emissions from energy consumption by source // EIA GOV USA. URL: <https://www.eia.gov/environment/> (date of access: 30.10.2021).
16. Power generation technology comparison from a life cycle perspective (report). URL: <https://www.osti.gov/biblio/1515245> (date of access: 30.10.2021).

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*SOBOLEV Nikita Eduardovich* – 2th year Master Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: [n.sobolew.2021@gmail.com](mailto:n.sobolew.2021@gmail.com)

*KRUPNOV Andrey Vladimirovich* – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: [AV.Krupnov@yandex.ru](mailto:AV.Krupnov@yandex.ru)

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Sobolev N.E., Krupnov A.V. Emissions related to electricity production and prospects for energy development // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 1 (13), pp. 39–50.

УДК 537.862

### ТРИИНДУКТИВНЫЙ ОСЦИЛЛЯТОР

*И.П. Попов*

*Курганский государственный университет (г. Курган)*

© Попов И.П., 2022

**Аннотация.** Существуют осцилляторы с взаимным преобразованием кинетической энергии груза в энергию либо магнитного, либо электрического поля, а также осцилляторы с взаимным преобразованием потенциальной энергии пружины в энергию либо электрического, либо магнитного поля. Целью работы являлось построение математической модели трииндуктивного осциллятора. Сделан вывод, что в *LLL* осцилляторе происходят свободные колебания тока (без питания извне), следовательно, любая фаза является источником реактивной мощности двух других фаз. Это создает предпосылку снижения потока реактивной мощности в сети за счет взаимной компенсации реактивной мощности фаз. Другими словами, фазы симметричной нагрузки частично могут обмениваться реактивной мощностью между собой, а не с сетью.

**Ключевые слова:** осциллятор, энергия, трииндуктивный, колебания, реактивная мощность, фаза.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2022-50-55**

#### ВВЕДЕНИЕ

Известны два основных вида колебаний: первый обусловлен взаимным преобразованием кинетической энергии груза в потенциальную энергию пружины; второй – энергии магнитного поля катушки в энергию электрического поля конденсатора.