

УДК 621.355:621.311.236

EDN WUENUY

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНОГО БУФЕРНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ И БЛОКОВ СУПЕРКОНДЕСАТОРОВ В АСИНХРОННОЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**

**О.С. Хватов**

ORCID: 0009-0007-0345-7523 e-mail: khvatov\_oleg@mail.ru

Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия***Д.К. Марков**

ORCID:0009-0002-7702-9541 e-mail: markov0priz@gmail.com

Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия***Т.З. Билялетдинов**

ORCID:0009-0009-6526-1598 e-mail: tim.bil.99@mail.ru

Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия*

Рассмотрена перспектива использования асинхронных машин с короткозамкнутым ротором в генераторных комплексах, особенно в малой энергетике. В настоящее время недостаточно изучены асинхронные дизель-генераторные электростанции, работающие при переменной частоте вращения (ДГПЧВ), и их интеграции с гибридными системами хранения энергии (аккумуляторные батареи и суперконденсаторы). Предложена структурная схема асинхронной ДГПЧВ с тремя контурами автоматического регулирования: механической мощности ДГПЧВ, частоты вращения ДГПЧВ и напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты. Описано назначение и состав каждого контура, а также роль гибридного накопителя энергии в стабилизации напряжения и обеспечении электроэнергией при различных режимах работы ДГПЧВ. Приведена имитационная модель асинхронной ДГПЧВ, созданная в *Matlab Simulink*, включающая в себя буферный накопитель электрической энергии (БНЭ). Выполнен имитационный эксперимент процессов заряда и разряда БНЭ при изменении нагрузки.

**Ключевые слова:** аккумулятор, гибридная система хранения электроэнергии, дизель-генераторная электростанция переменной частоты вращения, контур постоянного тока, суперконденсатор.

**Для цитирования:** Хватов О.С., Марков Д.К., Билялетдинов Т.З. Использование гибридного буферного накопителя электрической энергии на основе аккумуляторных батарей и блоков суперконденсаторов в асинхронной дизель-генераторной электростанции переменной частоты вращения // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 22-37. EDN WUENUY

## UTILIZATION OF HYBRID BUFFER ENERGY STORAGE BASED ON BATTERIES AND SUPERCAPACITORS IN ASYNCHRONOUS VARIABLE-SPEED DIESEL-GENERATOR POWER PLANT

**O.S. Khvatov**

ORCID: 0009-0007-0345-7523 e-mail: khvatov\_oleg@mail.ru

Volga State University of Water Transport

*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.K. Markov**

ORCID:0009-0002-7702-9541 e-mail: markov0priz@gmail.com

Volga State University of Water Transport

*Nizhny Novgorod, Russia*

**T.Z. Bilyaletdinov**

ORCID:0009-0009-6526-1598 e-mail: tim.bil.99@mail.ru

Volga State University of Water Transport

*Nizhny Novgorod, Russia*

The paper considers the prospects of using asynchronous machines with a squirrel-cage rotor in generator complexes, especially in small-scale distributed generation. Currently, asynchronous diesel-generator power plants operating at variable rotational speeds (variable-speed diesel-generator sets – VSDG), and their integration with hybrid energy storage systems (batteries and supercapacitors) are insufficiently studied. A structural diagram of an asynchronous VSDG with three automatic control loops is proposed: VSDG mechanical power, VSDG rotational speed and voltage in the DC link of the frequency converter. The purpose and composition of each loop are described, as well as the role of the hybrid energy storage in stabilizing voltage and providing electrical energy under various VSDG operating modes. A Matlab Simulink simulation model of the asynchronous VSDG including a buffer energy storage (BES) is presented. A simulation experiment of the BES charging and discharging processes during load changes was performed.

**Keywords:** battery, hybrid energy storage system, variable-speed diesel-generator power plant, DC link, supercapacitor.

**For citation:** O.S. Khvatov, D.K. Markov and T.Z. Bilyaletdinov, “Utilization of hybrid buffer energy storage based on batteries and supercapacitors in asynchronous variable-speed diesel-generator power plant”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 22-37, 2025. EDN WUENUY



- устройства для измерения напряжения ( $D_2$ ) и тока ( $D_3$ );
- измерителя мощности ( $B$ );
- устройства определения энергоэффективной частоты вращения

ДВС ( $3_1$ );

- устройства управления частотой вращения ( $P_1$ ).

Система поддержания заданной скорости вращения ДВС состоит из:

- датчика оборотов дизельного двигателя ( $D_1$ );
- устройства управления частотой вращения ( $P_1$ ).

Система поддержания постоянного напряжения на ЗПТ состоит из:

- датчика напряжения на шине постоянного тока ( $D_2$ );
- устройства регулирования напряжения ( $P_2$ );
- устройства задания напряжения на шине постоянного тока ( $3_2$ ).

Преобразователь частоты включает в себя активный выпрямитель напряжения ( $P_1$ ) и автономный инвертор напряжения ( $P_2$ ). Активный выпрямитель, дополненный входными дросселями (не показаны на рис. 1) и конденсаторной батареей ( $C$ ), обеспечивает возбуждение асинхронного генератора и поддержку напряжения постоянного тока в заданных пределах. Система использует гибридный накопитель энергии (БНЭ) – сочетание литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) и суперконденсаторов. При пиковых нагрузках блок суперконденсаторов поддерживает напряжение в заданных пределах в звене постоянного тока преобразователя частоты. При малой загрузке ДВС, когда мощность не превышает 25 % от номинала, режим работы ДВС на пониженных оборотах технологически нецелесообразен, в этом случае, функцию энергетического источника может выполнять ЛИАБ [2].

### III. Математическое описание элементов силового оборудования

Математическая (динамическая) модель ДВС с турбонаддувом может быть представлена системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (T_{a\mu} p + \delta_{a\mu}) y_0 &= k_1 y_n - \mu; \\ (T_{\tau} p + \delta_{\tau}) y_{\tau} &= k_{\tau} y_0 - y_n; \\ y_n (T_{\kappa} p + \delta_{\kappa}) &= y_{\tau} - k_{\kappa} y_0; \\ (T_{ax} p + \delta_{ax}) y_0 &= x_0 + k_{ax} y_n; \\ (T_{\tau} p + \delta_{\tau}) y_{\tau} &= k_{\tau} x_0 + k_{\tau} y_0 - y_n; \\ k_q q_{\kappa} &= x_0 + \theta_{\phi} y_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Математическое описание асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором в системе синхронно вращающихся координат  $X\dot{Y}$ :

$$\left. \begin{aligned} u_{SX} &= R_S i_{SX} + \frac{d\psi_{SX}}{dt} - \omega_1 \psi_{SY}; \\ u_{SY} &= R_S i_{SY} + \frac{d\psi_{SY}}{dt} + \omega_1 \psi_{SX}; \\ 0 &= R_R i_{RX} + \frac{d\psi_{RX}}{dt}; \\ 0 &= R_R i_{RX} + (\omega_1 - \omega_2) \psi_{RX}; \\ \psi_{SX} &= L_S i_{SX} + L_m i_{RX}; \\ \psi_{SY} &= L_S i_{SY} + L_m i_{RY}; \\ \psi_{RX} &= L_m i_{SX} + L_R i_{RX}; \\ 0 &= L_m i_{SY} + L_R i_{RY}. \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Уравнение нагрузки в сети:

$$U_1 = R_H I_H + L_H \frac{dI_H}{dt}. \quad (3)$$

Обозначения в (1)-(3) являются общепринятыми в теории двигателей внутреннего сгорания [3] и электрических машин [4] и в тексте статьи не приводятся.

#### IV. Анализ ключевых энергетических параметров гибридного накопителя электроэнергии

Работоспособность ЛИАБ определяется ее эффективной энергией – гарантированно отдаваемым объемом энергии на постоянную нагрузку  $R_{п.н.}$  при заданном напряжении [5]:

$$\Delta U_{a.б.} = U_{max.a.б.} - U_{min.a.б.}, \quad (4)$$

где  $\Delta U_{a.б.}$  – диапазон допустимых напряжений ЛИАБ;  $U_{max.a.б.}$  – максимальное допустимое напряжение ЛИАБ;  $U_{min.a.б.}$  – минимальное допустимое напряжение ЛИАБ.

При допущении  $R_{внутр.} \ll R_{п.н.}$  (что справедливо для ЛИАБ) минимальный запас энергии ( $W_{min.a.б.}$ ) при разряде на постоянную нагрузку  $R_{п.н.}$  ( $R_{п.н.} \approx const$ ) до  $U_{min.a.б.}$  за время  $\tau$  вычисляется следующим образом:

$$W_{min.a.б.} = \frac{\tau \cdot U_{min.a.б.}^2}{R_{п.н.}}. \quad (5)$$

Следующая формула рассчитывает максимальный теоретически возможный объем энергии ( $W_{\text{мах.а.б.}}$ ), отдаваемый ЛИАБ на постоянную нагрузку  $R_{\text{п.н.}}$  за время  $\tau$  при ограничении напряжения  $U_{\text{мах.а.б.}}$ :

$$W_{\text{мах.а.б.}} = \frac{\tau \cdot U_{\text{мах.а.б.}}^2}{R_{\text{п.н.}}} \quad (6)$$

Чтобы определить среднее потребление энергии постоянной нагрузкой в допустимом диапазоне напряжений ( $W_{\text{ср.эф.а.б.}}$ ), используется формула, полученная на основе (5) и (6):

$$W_{\text{ср.эф.а.б.}} = \frac{\tau \cdot (U_{\text{мах.а.б.}}^2 + U_{\text{мин.а.б.}}^2)}{2R_{\text{п.н.}}} \quad (7)$$

Емкость – важнейшая характеристика суперконденсатора. При использовании централизованной системы суперконденсаторов накопленная в ней энергия должна быть достаточной для покрытия всех пиковых нагрузок дизель-генераторной электростанции с переменной частотой вращения (ДГПЧВ) в течение импульса [6]. Предполагаемые границы изменения напряжения при разряде данной системы суперконденсаторов составляют:

$$\Delta U_{\text{б.с.к.}} = U_{\text{мах.б.с.к.}} - U_{\text{мин.б.с.к.}}, \quad (8)$$

где  $\Delta U_{\text{б.с.к.}}$  – диапазон допустимых напряжений блока суперконденсаторов (БСК);  $U_{\text{мах.б.с.к.}}$  – максимальное допустимое напряжение БСК;  $U_{\text{мин.б.с.к.}}$  – минимальное допустимое напряжение БСК.

Если не использовать дополнительные устройства стабилизации выходного напряжения блока суперконденсаторов, необходимо увеличивать интервал допустимых напряжений по верхнему пределу, поэтому его целесообразно проектировать с условием  $U_{\text{мах.б.с.к.}} > U_{\text{мах.а.б.}}$ . Увеличение  $U_{\text{мах.б.с.к.}}$  позволит суперконденсаторному блоку увеличить время автономной работы ДГПЧВ [7].

Для питания импульсной нагрузки ДГПЧВ ( $R_{\text{имп.н.}}$ ) необходимо выдать  $n$  последовательных импульсов длительностью  $\tau$ , разделенных интервалом  $T$ . В случае, когда интервал между импульсами пренебрежимо мал ( $T \approx 0$ ), средняя эффективная энергия, запасаемая в блоке суперконденсаторов ( $W_{\text{ср.эф.б.с.к.}}$ ), может быть приблизительно оценена следующим образом:

$$W_{\text{ср.эф.б.с.к.}} = \frac{n \cdot \tau \cdot (U_{\text{мах.б.с.к.}}^2 + U_{\text{мин.б.с.к.}}^2)}{2 \cdot (R_{\text{имп.н.}} + R_{\text{п.н.}})} \quad (9)$$

где  $R_{\text{имп.н}}$  – сопротивление импульсной нагрузки;  $R_{\text{п.н}}$  – сопротивление постоянной нагрузки.

Условие  $T \approx 0$  представляет собой наихудший сценарий нагрузки для блока суперконденсаторов. Однако это упрощает процесс проектирования, поскольку позволяет игнорировать релаксационные эффекты между импульсами, реально наблюдаемые в блоке суперконденсаторов [8].

Поведение блока суперконденсаторов представляет серию из  $n$  импульсов как один импульс длительностью  $tn$ . Количество последовательных ячеек ( $k$ ) зависит от характеристик нагрузки ДГПЧВ. Расчет энергии блока из  $k$  ячеек требует учета следующих факторов:

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{б.с.к.}} &= C_i / k \\ U_{\text{общ.б.с.к.}} &= kU_{\text{с.к.}} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где  $C_{\text{б.с.к.}}$  – общая емкость БСК;  $U_{\text{б.с.к.}}$  – общее напряжение БСК;  $C_i$  и  $U_{\text{с.к.}}$  – характеристики емкости и максимально допустимого (для работы) напряжения одной ячейки суперконденсатора.

Необходимое количество параллельных ветвей суперконденсаторов определяется максимальным разрядным током ячейки и вычисляется по формуле:

$$П = \frac{I_{\text{max.б.с.к.}}}{I_{\text{max.Ci}}}. \quad (11)$$

Для расчета используются следующие параметры:  $П$  (число параллельных ветвей, округленное до большего целого), каждая из которых содержит  $k$  последовательных суперконденсаторов; максимальный ток блока суперконденсаторов ( $I_{\text{max.б.с.к.}}$ ); максимальный ток одной ячейки ( $I_{\text{max.Ci}}$ ). Эффективная емкость блока  $C_{\text{эф.б.с.к.}}$ , рассчитанная по (9), равна:

$$C_{\text{эф.б.с.к.}} = \frac{W_{\text{ср.эф.б.с.к.}}}{U_{\text{max.б.с.к.}}^2 + U_{\text{min.б.с.к.}}^2} = \frac{\tau n}{2(R_{\text{имп.н}} + R_{\text{п.н}})}. \quad (12)$$

Благодаря наличию индуктивности и емкости в кабельной сети ДГПЧВ, скачки напряжения при коммутациях отсутствуют [9]. В связи с этим, в теоретических расчетах пренебрегли завалами фронтов импульса длительностью  $tn$ . Температурные эффекты ЛИАБ и суперконденсаторов не учитывались.

### V. Расчет буферной системы накопления энергии.

Учитывая технологические ограничения, связанные с эксплуатацией двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на частичных нагрузках (не более 25 % от номинальной мощности  $P_n$ ), определим требуемую энергоемкость буферного накопителя энергии (БНЭ). Этот блок должен обеспечивать электроснабжение потребителей в указанном диапазоне нагрузок в течение заданного интервала времени, например, одного часа [10].

Для расчета характеристик БНЭ приведем паспортные данные асинхронного двигателя (в табл. 1 приведены только некоторые из них).

**Таблица 1.**  
**Паспортные данные двигателя**

**Table 1.**  
**Engine passport data**

| Номинальная мощность, $P_n$ | Номинальная частота вращения, $n_n$ | Число пар полюсов, $p$ | Перегрузочная способность двигателя, $\lambda$ | Кратность пускового момента, $\lambda_{пуск}$ |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 37000 Вт                    | 1480 об/мин                         | 2                      | 2,2                                            | 1,8                                           |

Эффективная энергия БНЭ за указанный временной интервал (Вт·ч):

$$W_{\text{БНЭ}} = 0,25 \cdot P_n \cdot n_{\text{часов}} = 0,25 \cdot 37000 \cdot 1 = 9250. \quad (13)$$

С учетом потерь энергии в инверторе (сетевой блок преобразователя частоты  $P_2$ , (рис. 1), энергоемкость БНЭ составит (Вт·ч):

$$W_{\text{БНЭ}} = \frac{W_{\text{БНЭ}}}{0,98} = \frac{9250}{0,98} = 9714. \quad (14)$$

Емкость БНЭ ( $C_{\text{БНЭ}}$ ) предварительно определяем с учетом требования по поддержанию значения напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты  $U_d = 700\text{В}$  (рис. 1) (А·ч):

$$W_{\text{БНЭ}} = U_d \cdot I_{\text{БНЭ}} \cdot t \Rightarrow C_{\text{БНЭ}} = I_{\text{БНЭ}} \cdot t = \frac{W_{\text{БНЭ}}}{U_d} = \frac{9714}{700} \approx 13,87. \quad (15)$$

С целью поддержания срока службы аккумуляторной составляющей БНЭ рекомендуется поддерживать его заряд в диапазоне от 10 до 90 %. С учетом этого, расчетная емкость БНЭ ( $C_{\text{БНЭр}}$ ) (А·ч):

$$C_{\text{БНЭр}} = C_{\text{БНЭ}} / 0,8 = 13,87 / 0,8 = 17,3. \quad (16)$$

## VI. Имитационный эксперимент буферного накопителя электрической энергии

На основе структурной схемы асинхронной ДППЧВ (рис. 1) в среде *Matlab Simulink* была создана математическая имитационная модель (рис. 2) [11].

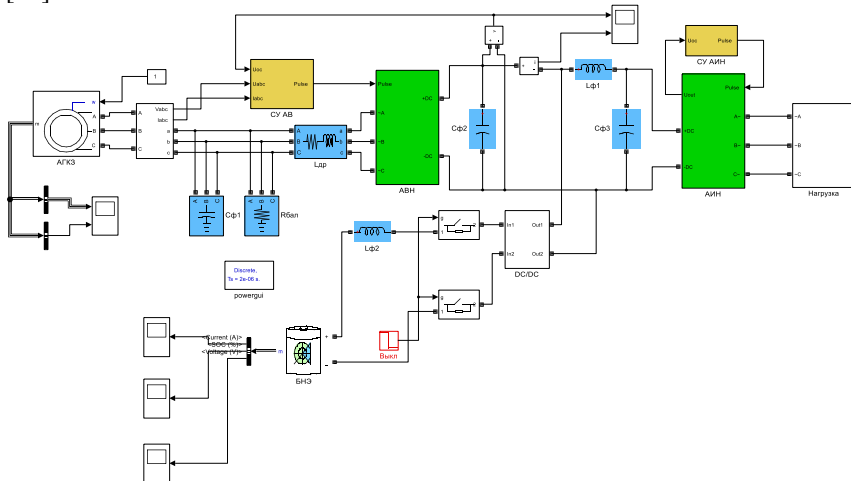


Рис. 2. Математическая имитационная модель ДППЧВ

Fig. 2. Mathematical simulation model of VSDG

Данная модель использовалась для симуляции процессов заряда и разряда буферного накопителя энергии (БНЭ). В начале моделирования БНЭ полностью заряжен и совместно с генератором обеспечивает питание нагрузки, соизмеримой с мощностью генератора. Затем, при увеличении мощности нагрузки на выходе инвертора в 1,5 раза, мощности генератора становится недостаточно, и БНЭ начинает разряжаться. Впоследствии мощность нагрузки снижается до уровня ниже номинальной мощности генератора. В результате избыточная мощность генератора используется для заряда БНЭ.

В модели *Matlab Simulink* имитация выполнялась в следующем порядке.

1. Начальное состояние: нагрузка отключена.
2. В момент времени 1,5 с. подключается номинальная нагрузка (соответствующая номинальной мощности генератора) мощностью 37 кВт.
3. В момент времени 2 с. мощность нагрузки увеличивается выше номинальной до 55 кВт.

4. В момент времени 3,5 с. мощность нагрузки уменьшается ниже номинальной до 20 кВт.

*Matlab Simulink* позволяет визуализировать графики мгновенных значений тока, заряда и напряжения БНЭ. Особое внимание уделялось анализу графиков тока и заряда, поскольку они позволяют однозначно определить протекающие процессы. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и 4. Их анализ показывает, что на первом этапе БНЭ разряжается, о чем свидетельствует положительное значение тока. Увеличение мощности нагрузки до 55 кВт приводит к ускорению процесса разряда. Снижение нагрузки до 20 кВт вызывает переход БНЭ в режим заряда, что отражается в отрицательном значении тока. Таким образом, при повышенной нагрузке БНЭ отдает энергию, а при наличии избыточной мощности генератора происходит его заряд [11].

*DC-DC* преобразователь управляет потоком электрической энергии между накопителем и шиной постоянного тока. Он может работать как в понижающем (заряд аккумулятора и/или суперконденсатора), так и в повышающем (передача энергии от накопителя в электрическую сеть) режимах. Управление потоком энергии между накопителем и сетью осуществляется с помощью полупроводникового моста, изменяющего рабочий цикл  $D$ .

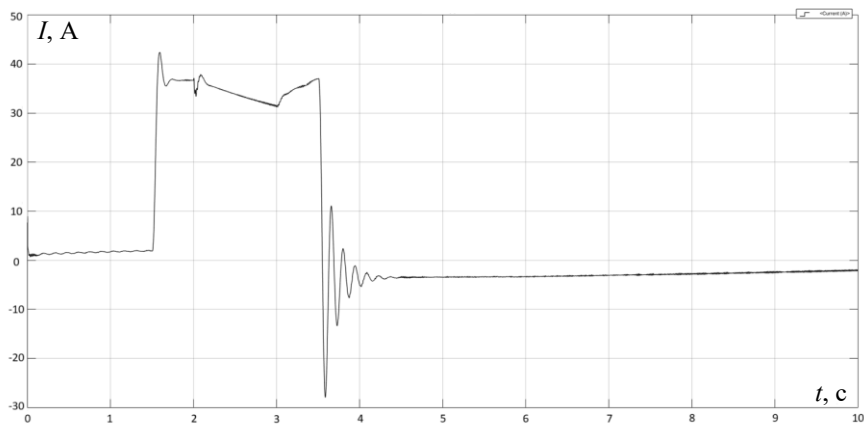


Рис. 3. Диаграмма изменения тока БНЭ

Fig. 3. Diagram of the BES current variation

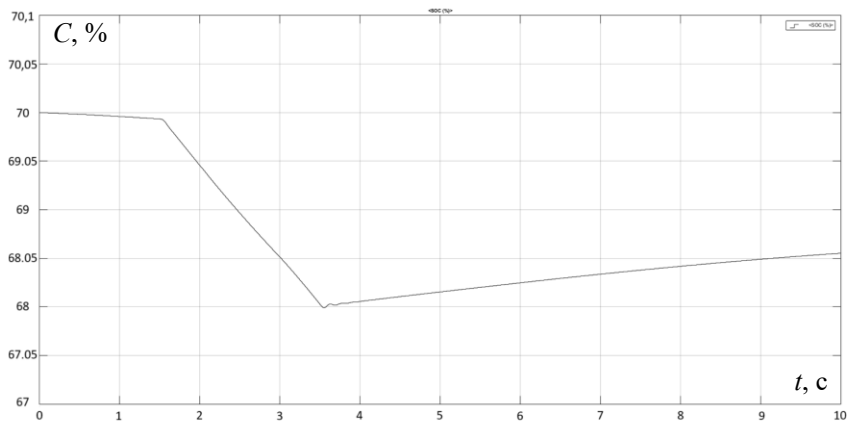


Рис. 4. Диаграмма изменения уровня заряда БНЭ

Fig. 4. Diagram of the BES state of charge variation

В режиме, когда необходимо понизить напряжение (рис. 5а), энергия передается из судовой сети в блок суперконденсаторов:

$$\frac{U_{\text{ск}}}{U_{\text{сети}}} = D_1, \quad (17)$$

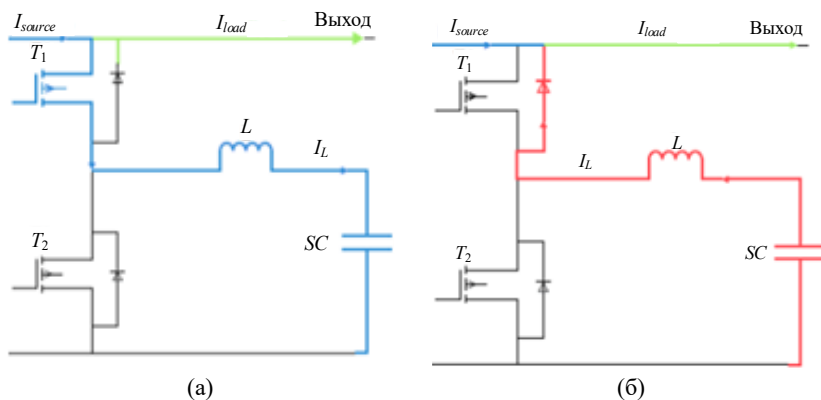
где  $U_{\text{ск}}$  – рабочее напряжение БСК;  $U_{\text{сети}}$  – сетевое напряжение;  $D_1$  – представляет собой рабочий цикл в понижающем режиме.

В режиме, когда необходимо повысить напряжение (рис. 5б), блок суперконденсаторов играет роль дополнительного источника энергии, что позволяет снизить нагрузку на основные источники, в частности на аккумуляторную батарею. Коэффициент повышения напряжения определяется следующим выражением:

$$\frac{U_{\text{ск}}}{U_{\text{сети}}} = \frac{1}{1 - D_2}, \quad (18)$$

где  $D_2$  – рабочий цикл в усиливающем режиме.

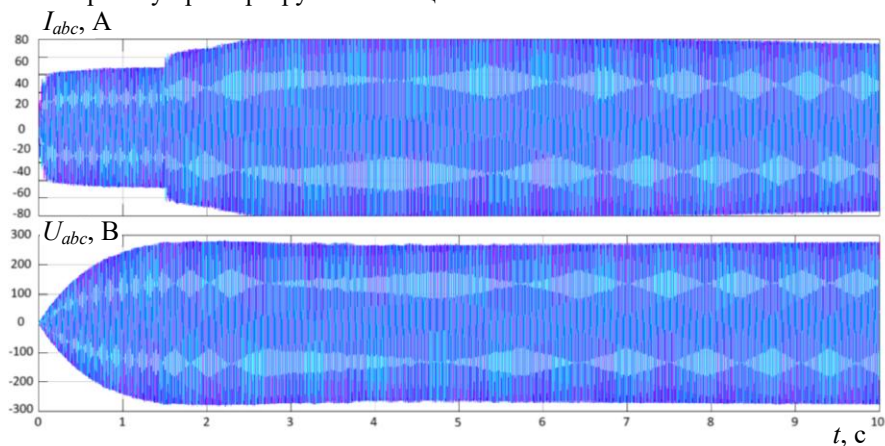
Поскольку в процессе эксплуатации часто возникают ситуации, когда ДППЧВ требуется кратковременно выдавать мощность, превышающую номинальную мощность генератора, в среде *Matlab Simulink* был проведен дополнительный эксперимент для оценки возможности работы ДППЧВ с двукратной перегрузкой по мощности.



**Рис. 5. Режимы преобразователя:**  
понижающего (а); повышающего (б)

**Fig. 5. Modes:**  
buck converter (a); boost converter (б)

Эксперимент заключался в следующем: модель изначально работала с нагрузкой, соответствующей номинальной мощности генератора (37 кВт). Затем на 3 сек была подключена нагрузка, вдвое превышающая номинальную (74 кВт, после чего она была возвращена к исходному номинальному значению. Результаты моделирования с перегрузкой представлены на рис. 6 и 7. Исходя данных рис. 7, видно, что модель ДППЧВ с БНЭ в ЗПТ обеспечивает работу при перегрузке по мощности.



**Рис. 6. Мгновенные значения тока и напряжения статора**

**Fig. 6. Instantaneous values of stator current and voltage**

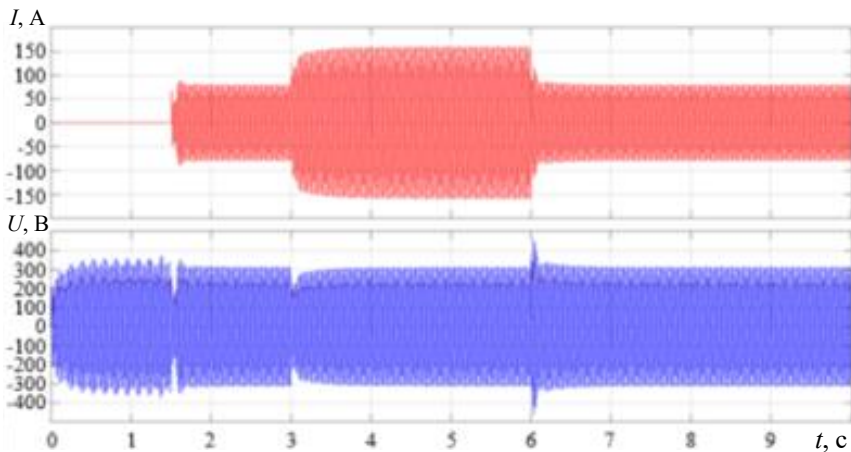


Рис. 7. Мгновенные значения тока и напряжение на выходе инвертора

Fig. 7. Instantaneous current and voltage values at the inverter output

## VII. Заключение

Учитывая результаты моделирования, можно сделать вывод о высоком потенциале использования асинхронных ДГПЧВ с гибридными накопителями энергии для повышения эффективности и стабильности электроснабжения, особенно в системах малой энергетики.

Разделение нагрузки между ДВС и БНЭ в ДГПЧВ осуществляется системой управления, которая стремится поддерживать стабильную частоту вращения ДВС и напряжение в звене постоянного тока. БНЭ играет роль стабилизатора мощности, компенсируя пиковые нагрузки и обеспечивая возможность работы системы в широком диапазоне нагрузок, включая перегрузки. Логика управления опирается на ограничение по минимальной нагрузке ДВС и необходимость поддержания заряда БНЭ в оптимальном диапазоне.

Предложенная структура, математические модели и результаты имитационного моделирования являются важным шагом на пути к созданию реальных систем подобного типа. Дальнейшие исследования следует направить на оптимизацию параметров системы, разработку более совершенных алгоритмов управления и проведение экспериментальных исследований.

© Хватов О.С., 2025

© Марков Д.К., 2025

© Билялетдинов Т.З., 2025

Поступила в редакцию 13.05.2025

Принята к публикации 08.07.2025

Received 13.05.2025

Accepted 08.07.2025

**Библиографический список**

- [1] Носкин Г.В., Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А. Гибридный накопитель электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов и блоков суперконденсаторов для систем электроснабжения возвращаемых космических аппаратов // Лесной вестник, 2019. Т. 23. № 4. С. 39-48. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48
- [2] Григорьев А.В., Малышев С.М., Зайнуллин Р.Р. Опыт проектирования и испытаний первого отечественного судового вентильного дизель-генератора // Вестник Государственного Университета Морского и Речного Флота имени Адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11. № 4. С. 766-775. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-766-775
- [3] Виноградов А.Б. Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с КЗ ротором и преобразователя частоты пониженной мощности // XI межд. (XXII всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП 2020, Окт. 04-07, 2020, Санкт-Петербург, Россия: ИТМО, 2020. С. 80-86.
- [4] Виноградов А.Б. Горелкин Р.О. Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с фазным ротором и преобразователя частоты малой мощности // Вестник Ивановского Государственного Энергетического Университета. 2023. № 3. С. 43-51. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.043-051
- [5] Taoufik M., Lassad S. Experimental stand-alone self-excited induction generator driven by a diesel motor // Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2017. № 4 (3). P. 377-386. DOI: 10.1016/j.jesit.2016.08.005
- [6] Reddy S.R.K., Subrahmanyam J.B.V., Reddy A.S. Control of self-excited induction generator based wind turbine by using by IM controller // Asian Journal for Convergence in Technology (AJCT). 2023. № 9 (3). P. 71-81. DOI: 10.33130/AJCT.2023v09i03.012
- [7] Sun Y., Hu J., Li C. Research on power generation control of asynchronous machine as main generator // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2020. № 21 (2). 20190059. DOI: 10.1515/ijeeps-2019-0059
- [8] Khamis A.A.H., Ahmed-Zaid S. Computer simulation of a series-connected induction generator and determination of minimum required capacitance for self-excitation for wind energy applications // proc. 2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC), Oct. 29-31, 2021, Hammamet, Tunisia: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/IREC48820.2020.9310389
- [9] Хватов О.С., Кобяков Д.С. Асинхронные дизель-генераторные электростанции переменной частоты вращения // Интеллектуальная электротехника. 2022. № 3 (19). С. 19-31. DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_3\_19
- [10] Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоявчев И.С., Поляков И.С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения. Н. Новгород: НГТУ, 2016. – 172 с.
- [11] Хватов О.С., Гарпанов И.А., Билялетдинов Т.З. Автономная дизель-генераторная электростанция на основе асинхронного генератора с вентильным возбуждением и системой автоматического регулирования напряжения с векторным управлением // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 19-31.

## References

- [1] G.V. Noskin, E.S. Khavanov and R.A. Beschastnyy, "Hybrid electric power storage based on lithium-ion batteries and supercapacitors blocks for power supply system of earth return spacecraft", *Forestry Bulletin*, vol. 23, no. 4, pp. 39-48, 2019. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48
- [2] A.V. Grigoriev, S.M. Malyshev and R.R. Zainullin, "Experience of designing and testing the first native shipboard valve diesel-generator", *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota imeni Admirala S.O. Makarova*, vol. 11, no. 4, pp. 766-775, 2019. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-766-775
- [3] A.B. Vinogradov, "Avtonomnaya stanciya elektrosnabzheniya na osnove asinhronnogo generatora s KZ rotorom i preobrazovatelya chastoty ponizhennoj moshchnosti [Autonomous power supply station based on an asynchronous generator with a squirrel-cage rotor and a low-power frequency converter]", in proc. *XI Int. (XXII All-Russ.) conf. "Avtomatizirovannyi elektropriwod AEP 2020 [Automated Electric Drive AED 2020]"*, Oct. 04-07, 2020, St. Petersburg, Russia, pp. 80-86 (in Russian).
- [4] A.B. Vinogradov and R.O. Gorelkin, "Autonomous power supply station based on asynchronous generator with phase rotor and low-power frequency converter", *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, no. 3, pp. 43-51, 2023. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.043-051
- [5] M. Taufiq and S. Lassad, "Experimental stand-alone self-excited induction generator driven by a diesel motor", *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 377-386, Dec. 2017. DOI: 10.1016/j.jesit.2016.08.005
- [6] S.R.K. Reddy, J.B.V. Subrahmanyam and A.S. Reddy, "Control of self-excited induction generator based wind turbine by using by IM controller", *Asian Journal for Convergence in Technology (AJCT)*, vol. 9, no. 3, pp. 71-81, 2023. DOI: 10.33130/AJCT.2023v09i03.012
- [7] Y. Sun, J. Hu and C. Li, "Research on power generation control of asynchronous machine as main generator", *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 21, no. 2, 20190059, Mar. 2020. DOI: 10.1515/ijeeps-2019-0059
- [8] A.A.H. Khamis and S. Ahmed-Zaid, "Computer simulation of a series-connected induction generator and determination of minimum required capacitance for self-excitation for wind energy applications", in proc. *2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Oct. 29-31, Hammamet, Tunisia, 2021. DOI: 10.1109/IREC48820.2020.9310389
- [9] O.S. Khvatov and D.S. Kobayakov, "Asynchronous diesel generator sets with variable speed", *Smart Electrical Engineering*, vol. 3, no. 19, pp. 19-31, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_3\_19
- [10] O.S. Khvatov, A.B. Darienkov, I.S. Samoyavchev and I.S. Polyakov, *Avtonomnye generatorynye ustanovki na osnove dvigatelej vnutrennego sgoraniya peremennoj chastoty vrashcheniya [Autonomous generator sets based on variable-speed internal combustion engines]*. N. Novgorod: NNSTU, 2016 (in Russian).
- [11] O.S. Khvatov, I.A. Tarpanov and T.Z. Bilyaletdinov, "Stand alonediesel generator power plant based on asynchronous generator with valve excitation and automatic voltage control system with vector control", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 19-31, 2024.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ  
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Хватов Олег Станиславович**, доктор технических наук, профессор Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Oleg S. Khvatov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Марков Дмитрий Константинович**, аспирант Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Dmitry K. Markov**, postgraduate student of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Билиялетдинов Тимур Закарияевич**, аспирант Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Timur Z. Bilyaletdinov**, postgraduate student of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation