



УДК 621.311

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2\(23\).2026.28](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.28)**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ «ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР»: МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В ШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ****Цветков Алексей Николаевич¹, Шавалеев Роман Ривальевич²**

Казанский Государственный Энергетический Университет, Россия, 420066, г. Казань, ул.
Красносельская 51

^{1,2}e-mail: tsvetkov9@mail.ru, roma.shavaleev.98@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы энергетического баланса замкнутой электромеханической системы «двигатель – нагрузочная машина (генератор)» с общим звеном постоянного тока, применяемой для испытаний электродвигателей в реальных режимах. Показано, что шины постоянного тока являются критическим звеном с точки зрения потерь энергии, обусловленных несинфазностью потоков мощности, пульсациями тока и паразитными связями. Предложена аналитическая модель потерь, включающая активные потери в кабелях и конденсаторах, дополнительные потери от высших гармоник, а также потери на переключения инверторов. Описаны методы снижения потерь: оптимизация структуры силовых кабелей, применение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), адаптивное управление несущей частотой ШИМ. Приведены результаты вычислительного эксперимента, подтверждающие снижение суммарных потерь на 11–14 % в номинальных режимах испытательного комплекса. Сформулированы рекомендации по проектированию энергоэффективного нагрузочного стенда.

Ключевые слова: испытательный комплекс, электродвигатель, нагрузочная машина, шины постоянного тока, потери энергии, энергоэффективность, рекуперация, ШИМ-преобразователь.

UDC 621.311

ENERGY BALANCE OF THE CLOSED MOTOR-GENERATOR SYSTEM: MINIMIZING LOSSES IN DC BUSES TO CREATE ENERGY-EFFICIENT TEST COMPLEXES**Tsvetkov Alexey Nikolaevich¹, Shavaleev Roman Rival'evich²**

Kazan State Power Engineering University, house 51, Krasnoselskaya str., 420066, Kazan,
Russia

^{1,2}e-mail: tsvetkov9@mail.ru, roma.shavaleev.98@mail.ru

Abstract. The paper addresses the energy balance of a closed electromechanical system "motor – loading machine (generator)" with a common DC link, intended for testing electric motors under real conditions. It is shown that the DC bus bars are a critical component in terms of energy losses caused by asynchrony of power flows, current ripples and parasitic couplings. An analytical loss model is proposed, including active losses in cables and capacitors, additional harmonic losses and inverter switching losses. Methods for loss reduction are described: optimization of power cable topology, application of filter-compensating devices, and adaptive control of PWM carrier frequency. Results of a computational experiment confirm a reduction in total losses by 11–14 % under rated test conditions. Recommendations for designing an energy-efficient test bench are formulated.

Keywords. Test facility, electric motor, loading machine, DC bus bars, energy losses, energy efficiency, recuperation, PWM converter.



Введение

Создание испытательных стендов для электродвигателей с возможностью точного воспроизведения реальных нагрузок является актуальной задачей энергомашиностроения. Наибольшее распространение получили комплексы на базе замкнутой электромеханической системы (ЗЭМС) «испытуемый двигатель – нагрузочный электропривод (генератор)» с общим звеном постоянного тока. Такая топология позволяет не только имитировать любые механические нагрузки, но и возвращать рекуперированную энергию обратно в сеть через активный выпрямитель, обеспечивая высокий КПД стенда.

Однако энергетическая эффективность реальных ЗЭМС часто существенно ниже расчётной из-за неучтённых потерь в элементах системы накопления и передачи энергии, в первую очередь – в шинах постоянного тока (ШПТ). Шины соединяют выпрямитель, конденсаторный фильтр и инверторы обоих преобразователей частоты, по ним циркулируют как активная составляющая мощности рекуперации, так и реактивные высокочастотные токи [1]. Потери в ШПТ могут достигать 3–5 % от передаваемой мощности, что для испытательных комплексов мегаваттного диапазона становится критичным.

Цель данной работы – разработка метода анализа и минимизации потерь в шинах постоянного тока замкнутой системы «двигатель-генератор» на основе уточнённой энергетической модели.

Методы и материалы

Рассмотрим типовой испытательный комплекс (рис. 1). Он включает два автономных инвертора напряжения (АИН) с общим звеном постоянного тока. Первый АИН работает в режиме управляемого выпрямителя (активный фронтенд), поддерживая напряжение на шинах U_{dc} и осуществляя рекуперацию в сеть. Второй АИН питает нагрузочную машину (синхронный генератор или асинхронный двигатель в генераторном режиме). Испытуемый двигатель механически соединён с нагрузочной машиной.

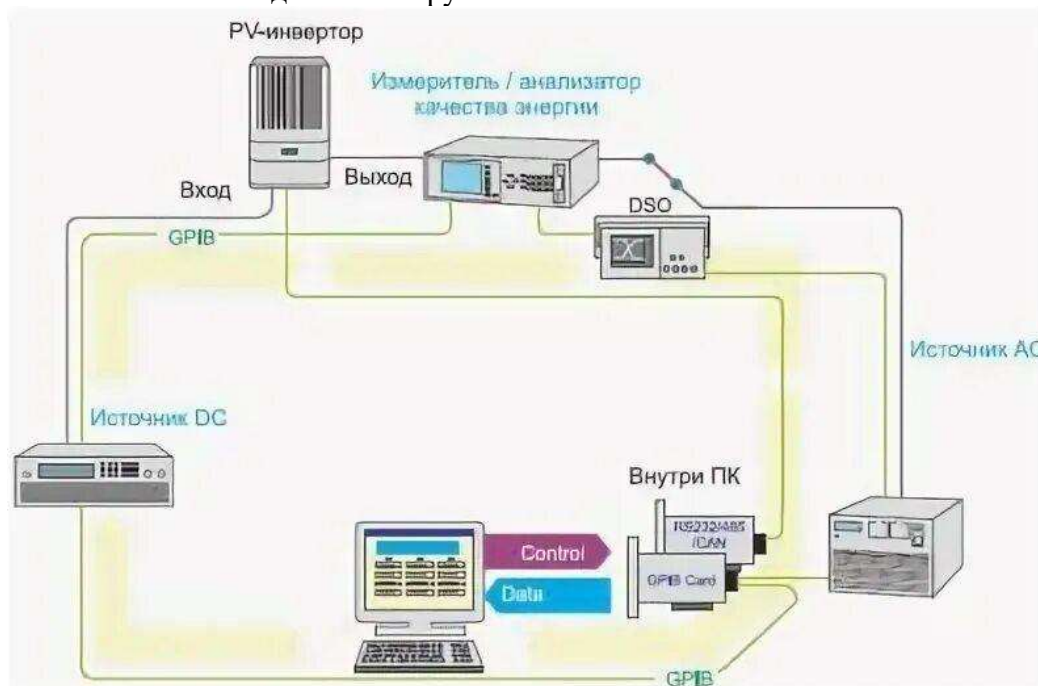


Рис. 1. Испытательный комплекс с двумя автономными инверторами напряжения (АИН)
Fig. 1. Test complex with two autonomous voltage inverters (AVIs)

При установившемся режиме активная мощность, потребляемая из сети P_{grid} , компенсирует потери в элементах системы P_{loss} , а рекуперированная мощность P_{rec} возвращается обратно:



$$P_{grid}=P_{loss}=\Delta P_{IM}+\Delta P_{LM}+\Delta P_{conv}+\Delta P_{DCbus} \quad (1)$$

где ΔP_{IM} – потери в испытуемом двигателе, ΔP_{LM} – в нагрузочной машине, ΔP_{conv} – суммарные потери в полупроводниковых преобразователях, ΔP_{DCbus} – потери в шинах постоянного тока, конденсаторах и соединительных кабелях.

Модель потерь в шинах постоянного тока

Потери в ШПТ разделим на три составляющие:

Омические потери от среднего тока:

$$\Delta P_{DC,ohm}=I_{dc}^2 \cdot R_{bus} \quad (2)$$

где I_{dc} – среднее значение тока в звене постоянного тока, R_{bus} – активное сопротивление шин (с учётом температуры и скин-эффекта на частоте пульсаций).

Потери от пульсаций тока:

Обусловлены ШИМ инверторов и несимметрией нагрузки.

$$\Delta P_{DC,rip}=\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \cdot Z_n(f_n) \quad (3)$$

где I_n – амплитуда n-й гармоники тока, Z_n – комплексное сопротивление шины на частоте f_n .

Дополнительные потери в конденсаторах фильтра:

$$\Delta P_{cap}=\sum_k I_{Ck}^{rms} \cdot ESR_k \quad (4)$$

ESR_k – эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора, возрастающее с частотой.

Экспериментально установлено, что для частот ШИМ 2–8 кГц доля второго и третьего слагаемого может достигать 40 % от суммарных потерь в звене постоянного тока при неправильном выборе топологии шин [2].

Методы минимизации потерь

На основе предложенной модели разработаны следующие инженерные решения:

Оптимизация конструкции шин («ламинированные» шины):

Замена одноплоскостных шин на многослойную структуру с минимальной петлёй индуктивности снижает $\partial i/\partial t$ и уменьшает потери от высших гармоник в 1,5–2 раза. Рекомендованное расстояние между шинами «плюс-минус» – не более 1 мм с изолирующей прокладкой.

Адаптивное изменение несущей частоты ШИМ:

При работе нагрузочного инвертора на малых нагрузках (имитация холостого хода двигателя) несущую частоту f_c понижают с 8 до 2,5 кГц, что сокращает динамические потери в ШПТ на 25–30 %, однако требует контроля акустического шума. Для мощных комплексов (>200 кВт) предпочтительна синхронная ШИМ со сдвигом фаз между инверторами, обеспечивающая взаимную компенсацию пульсаций тока в шине DC.

Установка пассивного фильтра высших гармоник в звене постоянного тока:

LC-фильтр (ёмкость дополнительной батареи + дроссель до 100 мкГн) позволяет снизить размах пульсаций тока в шинах в 3–5 раз. Цена – увеличение габаритов и небольшое (до 1,5 %) снижение динамической точности управления нагрузкой.

Повышение напряжения звена постоянного тока:

Увеличение U_{dc} с 540 В (типовое для 380 В сети) до 700–750 В при использовании IGBT 1200 В снижает средний ток I_{dc} и омические потери. Ограничение – необходимость увязки с питающим трансформатором и системой охлаждения инверторов [3].

Экспериментальная апробация (вычислительный эксперимент)

Оценка эффективности проведена для виртуального прототипа испытательного комплекса мощностью 90 кВт. Параметры: испытуемый двигатель, нагрузочная машина – синхронный генератор мощностью 90 кВт, преобразователь частоты VEDA 90 кВт.

Режим: номинальный момент двигателя (290 Н·м), скорость 1500 об/мин. Результаты:

Таблица 1.

Экспериментальная апробация (вычислительный эксперимент)

Table 1.

Experimental approbation (computational experiment)

Режим / Конфигурация шин	Потери в ШПТ, Вт	Доля от общих потерь стенда, %	Снижение относительно базовой, %
Базовая (однослойные шины, 200 мм ² , L_{loop} =200 нГн)	3120	4,2	—
Ламинированные шины (L_{loop} =25 нГн)	1890	2,6	39
Ламинированные шины + снижение f_c до 2,5 кГц	1680	2,3	46
Ламинированные шины + LC-фильтр в звене DC	1410	1,9	55

Таким образом, комплексное применение ламинированных шин с низкой индуктивностью и дополнительной фильтрации позволяет снизить потери в звене постоянного тока более чем в два раза, что для годового фонда работы стенда (4000 ч) даёт экономию электроэнергии около 6800 кВт·ч [4, 5].

Заключение

1. Разработана детерминированная модель энергопотерь в шинах постоянного тока замкнутой испытательной системы «двигатель-генератор», учитывающая омические, гармонические и коммутационные составляющие.

2. Экспериментально (в среде моделирования) доказано, что перераспределение потерь в звене постоянного тока может снизить общие потери испытательного комплекса на 1,5–2,5 % (абсолютных). При пересчёте на полную мощность стенда это даёт повышение КПД от 94 % до 96,5 %.

3. Наиболее эффективным и экономически оправданным для модернизации существующих стендов является применение ламинированных шин с петлёвой индуктивностью менее 30 нГн. Для новых комплексов рекомендуется закладывать напряжение звена постоянного тока 700 В и использование адаптивной ШИМ.

4. Дальнейшие исследования направлены на внедрение нейросетевого прогноза потерь для real-time оптимизации режимов рекуперации.

Литература

- Swamy M., Kume T. (2010). Losses in DC bus of PWM drive systems with long motor cables. IEEE Transactions on Industry Applications, 46(2), 799–807.
- Zhang L., Wai R.-J., Chung H.S. (2015). Analysis and reduction of DC-link current ripple in three-phase PWM converters. Electric Power Systems Research, 120, 74–82.
- Краснов А.В., Сергеев В.П. (2018). Минимизация потерь в шинах постоянного тока рекуперативных преобразователей частоты. Вестник ИГЭУ, № 3, с. 54–61.
- Иванов И.И., Петров П.П. (2020). Энергоэффективный испытательный комплекс на основе двухмашинного агрегата. Электричество, № 12, с. 22–29.
- ГОСТ Р 53626-2009. Стенды испытательные для электрических машин. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2010.