

Интеграция систем беспроводной передачи энергии в микросети постоянного тока (Меликов А.В.)

В настоящее время направление инноваций в электрических сетях приближает переход от крупных электростанций к множеству небольших децентрализованных местных и индивидуальных энергоисточников (в большинстве случаев электрогенерация которых осуществляется на основе ВИЭ) вместе с системами накопления энергии. Поэтому переход от архитектуры сетей переменного тока к архитектуре сетей постоянного тока получает всё большее одобрение специалистов. В частности, постоянно растущие нагрузки электронные постоянного тока (массовое использование электронных устройств) и необходимость разработки эффективных методов управления энергопотреблением в связи с широким применением ВИЭ являются одними из наиболее важных причин, которые подталкивают к созданию архитектуры сетей постоянного тока [96].

ВИЭ являются источниками постоянного тока или, по крайней мере, имеют в своём составе устройство постоянного тока. Более того, точка соединения нагрузок и накопителей энергии подпитывается постоянным током. Описанные выше особенности хорошо вписываются в топологию микросетей постоянного тока, объединяющих в себе генераторы и нагрузки, подключённые к одной шине постоянного тока. Другими словами, источник питания с выходом постоянного тока подключается к шине постоянного тока напрямую или с помощью преобразователей постоянного тока в постоянный.

Повышение эффективности работы сети достигается сокращением числа ступеней преобразования мощности. Кроме того, схема управления в микросетях постоянного тока проще соответствующей схемы микросетей переменного тока, поскольку в ней отсутствуют проблемы с потоком реактивной мощности и синхронизацией.

Архитектура микросетей постоянного тока, как правило, включает два

уровня напряжения, а именно шины высокого и низкого напряжений (Рисунок 55).

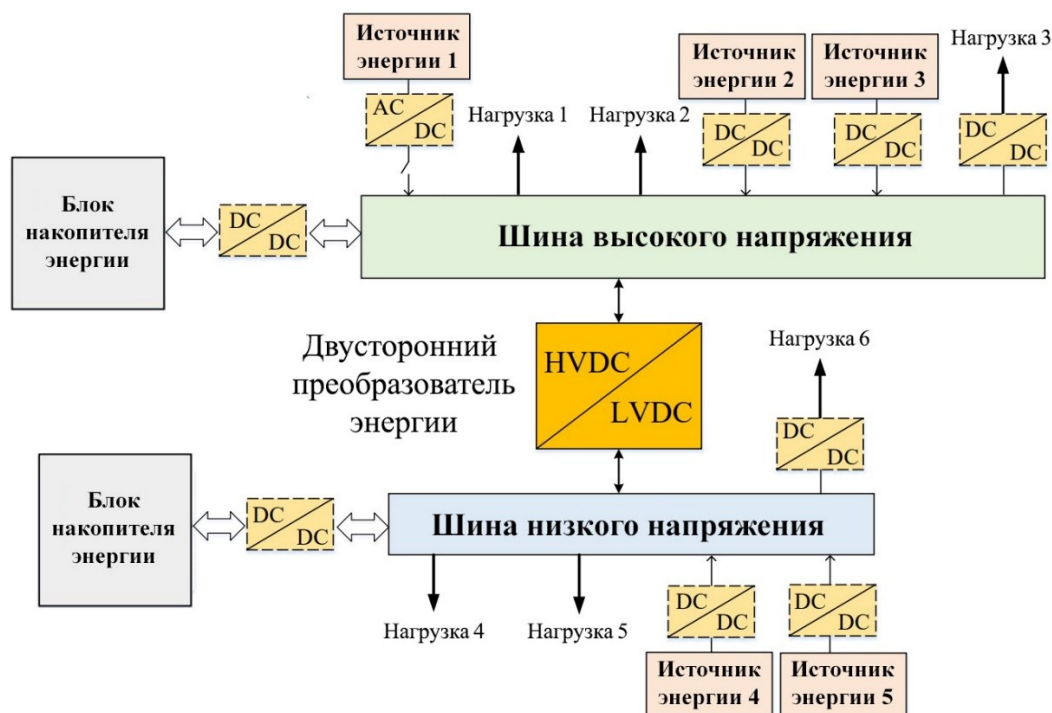


Рисунок 55. – Архитектура типичной микросети постоянного тока

Обе шины соединены с нагрузками и источниками питания посредством силовых электронных преобразователей, что в совокупности обеспечивает двунаправленный поток энергии между шинами и устройствами. Микросети постоянного тока могут содержать накопители энергии для компенсации переходных процессов напряжения и стабилизации нагрузки, а также для соответствия требованиям, предъявляемым к управлению энергопотреблением [34].

Очень вероятно, что будущие распределительные электрические сети будут основаны на архитектуре микросети постоянного тока [97], [98], [99], которая может быть интегрирована как в сеть, так и в рынок электроэнергии и мощности. Например, электрифицированные транспортные средства, станции зарядки электромобилей, жилые, коммерческие и промышленные объекты. В целом, развитие микросети будет способствовать повышению роли потребителя в управлении энергосистемой.

Однонаправленные преобразователи (см. Рисунок 55) соединяют

нагрузки и генераторные установки, такие как фотоэлектрические системы и/или (небольшие) ветряные турбины, с шинами высокого и низкого напряжений, в то время как двунаправленные преобразователи постоянного тока в постоянный (DC/DC) отвечают за взаимосвязь между шинами и накопителями энергии. К сегодняшнему дню отечественные и зарубежные учёные для применения микросетей постоянного тока предложили различные топологии построения силовой части преобразователя. Среди них весьма привлекательным решением являются преобразователи постоянного тока в постоянный со встроенным высокочастотным трансформатором. Такая топология сети обеспечивает высокий КПД, гальваническую развязку и возможность переключения при нулевом напряжении. Кроме того, к преимуществам высокочастотного трансформатора относят высокую надёжность, малые габариты и низкую стоимость [31].

В этой работе рассматривается трансформатор с воздушным сердечником в качестве средства для реализации высокочастотного трансформатора и как способ упрощения проводки при использовании нескольких рассредоточенных генерирующих устройств в микросетях постоянного тока. Последнее особенно важно в бытовых и коммерческих микросетях. Действительно, при установке фотоэлектрических систем в зданиях такой подход улучшает интеграцию силовой электроники модульного уровня, придавая гибкость проектированию электрических сетей при одновременном упрощении процесса установки оборудования и работы по техническому обслуживанию. Кроме того, замена распределительных коробок фотоэлектрических панелей беспроводными системами передачи энергии и сокращение количества кабелей положительно отражаются на балансе всей системы [12], её надёжности. На Рисунок 56 представлены два способа присоединения ВИЭ малой мощности к шинам микросети здания посредством преобразователей постоянного тока в постоянный и системы беспроводной передачи энергии.

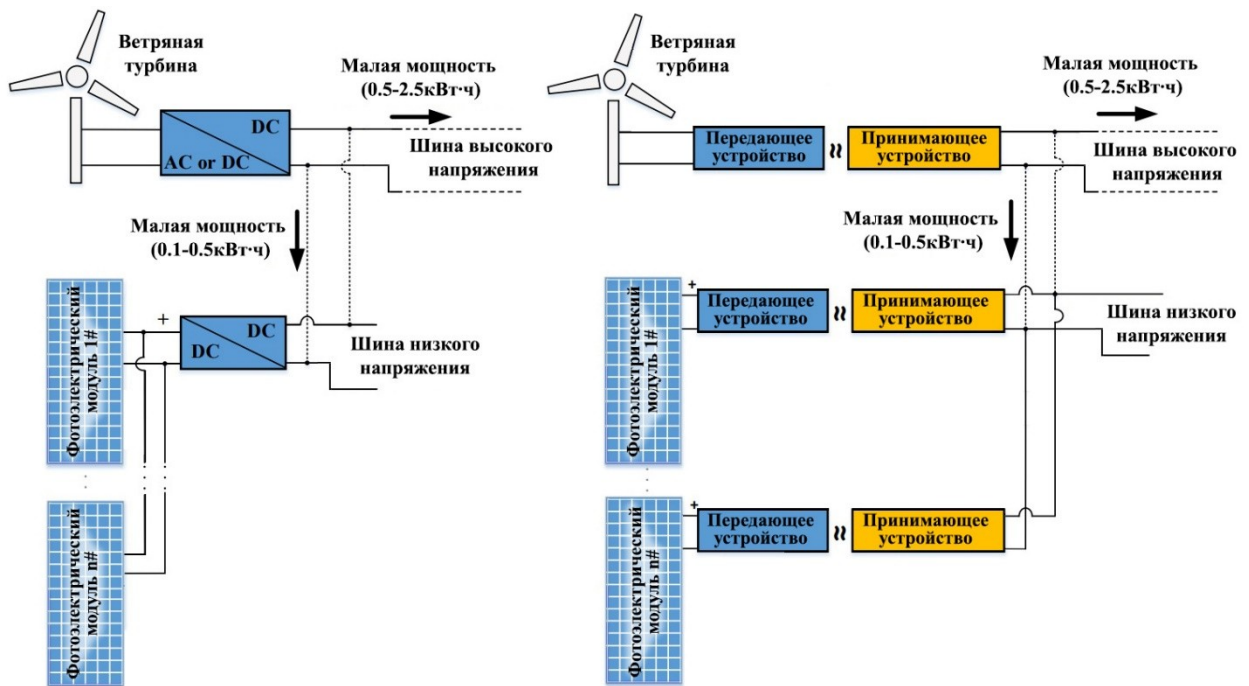


Рисунок 56. – Присоединение ВИЭ малой мощности к микросети здания:
 а) преобразователями постоянного тока в постоянный,
 б) системой беспроводной передачи энергии

Рассматриваемый в этой работе трансформатор с воздушным сердечником состоит из двух слабо связанных катушек для беспроводной передачи энергии между источником и нагрузкой. Известно, что недостатком системы беспроводной передачи энергии является её ограниченность (как и любая другая беспроводная технология, эта тоже имеет определённые границы). Однако недавние исследования показали, что при современном конструктивном исполнении электрических сетей система беспроводной передачи энергии, с точки зрения удельной мощности, может достичь результатов, сопоставимых с преобразователями электрической энергии (особенно в случаях применения в системах распределённой генерации с низким энергопотреблением). Более того, согласно научным трудам Г.А. Човича (и его коллег) системы беспроводной передачи энергии характеризуются высокой надёжностью.

Базовая идея интеграции системы беспроводной передачи энергии, – обычно состоящей из источника постоянного напряжения, высокочастотного преобразователя напряжения, первичной (передатчик) и вторичной

(приёмник) катушек, выпрямителей напряжения и нагрузки, – в микросети постоянного тока заключается в разработке распределённой сети преобразователей (инверторов), способных использовать все возможные источники энергии в здании (или транспортном средстве) в сочетании с различными накопителями энергии, такими как топливные элементы, аккумуляторы и суперконденсаторы. Широко распространёнными распределёнными источниками энергии являются фотоэлектрические модули (солнечные панели) или их массивы, малогабаритные ветряные турбины и микро-ТЭЦ. Вышеперечисленные источники энергии вполне могут быть интегрированы в здания с нулевым (или почти нулевым) потреблением, которые, как ожидается, станут важным компонентом будущих городских электрических сетей. В этом исследовании основное внимание уделяется системе беспроводной передачи электроэнергии с последовательной (продольной) компенсацией (Рисунок 57).

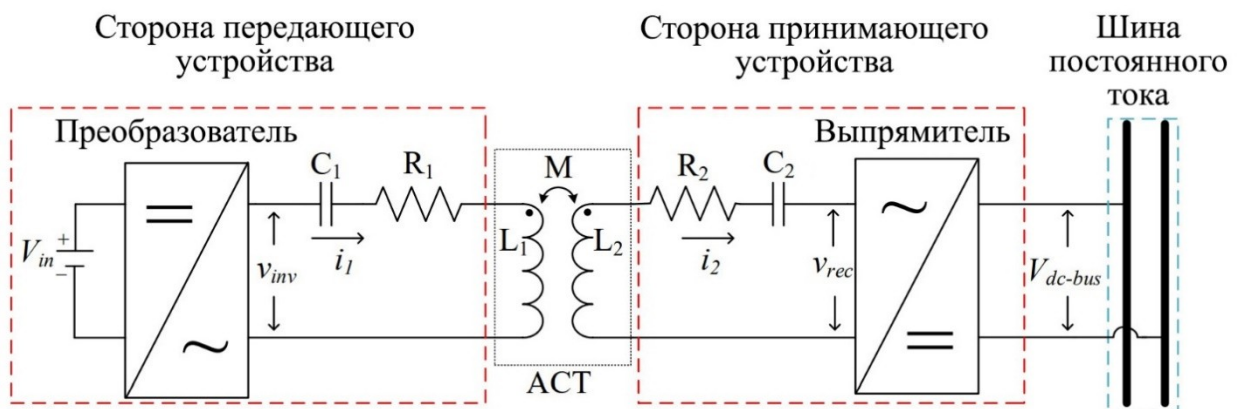


Рисунок 57. – Система беспроводной передачи энергии с последовательной компенсацией

Стоит отметить, что в некоторых случаях, например, с электромобилями существенным недостатком использования систем беспроводной передачи электроэнергии является наличие магнитного поля в зонах деятельности человека. Это, безусловно, критическая проблема, которая сегодня решается экранированием катушек в соответствии с требованиями Международной комиссии по защите от неионизирующего излучения.

Анализ системы беспроводной передачи энергии с последовательной компенсацией проводился в работах Э. Гатиса («Проектирование, конструирование и управление системами индуктивной передачи энергии», 2016 г.), А. Купермана («Выбор компенсационных конденсаторов для ...», 2020 г.), О. Кнехта и Дж.В. Колар («Оценка эффективности IPT-систем с последовательной компенсацией для ...», 2019 г.) и др.; однако это были исследования систем, передача мощности в которых осуществлялась при чисто активной (омической) нагрузке. Объектом их исследований были зарядные устройства, в которых поведение систем накопления энергии считается медленным. В этой работе анализ сосредоточен на характере нагрузки, которая рассматривается как источник (питания) постоянного напряжения. Поэтому это исследование системы беспроводной передачи энергии с последовательной компенсацией отличается от предыдущих учётом эквивалентного сопротивления участка сети. В частности, выпрямитель, связанный с шиной напряжения (см. Рисунок 57), не может быть смоделирован с эквивалентным сопротивлением, особенно в случаях работы системы за пределами резонансной области.

В статье Г. Гуиди и Дж.А. Суул «Минимизация требований к преобразователям индуктивных систем передачи энергии с нагрузкой постоянного напряжения», 2016 г. рассматривается усовершенствованная модель, представляющая выпрямительное устройство с источником напряжения, математическое описание которой [модели] строится на предположении, что в диодном мосту и катушках коэффициент реактивной мощности (выпрямителя) равен единице. Это моделирование является более репрезентативным, чем эквивалентное сопротивление, но оно приводит к неточным результатам при расчёте выходной мощности системы из-за отличного от единицы коэффициента мощности, с которым фактически работает диодный мост. Поэтому требуется более детальная модель системы беспроводной передачи энергии, учитывающая коэффициент реактивной мощности диодного моста не равный единице.

По этой причине в этой работе рассматривается полный диапазон гармоник напряжения/тока, чтобы определить точное значение коэффициент реактивной мощности (выпрямителя).

Основной целью исследования является внедрение систем беспроводной передачи энергии в микросети постоянного тока для генерации и хранения электроэнергии, осуществляемых различными (небольшими) устройствами, подключёнными к сети или распределительной системе. По этой причине автором предпринята попытка подробного описания и анализа поведения такой системы.

Математический анализ системы беспроводной передачи энергии, изображённой на Рисунке 57, проведён во всём диапазоне гармонических составляющих. Анализ схемы выполнен для случая, когда нагрузка является источником постоянного напряжения, что позволяет адекватно моделировать подачу энергии в шину постоянного тока, и при условии, что проводимость тока на диодный мост осуществляется в непрерывном (безразрывном) режиме. Следовательно, диодный мост вместе с нагрузкой постоянного тока может быть представлен источником (генератором) напряжения прямоугольной формы. Аналогично, преобразователь с источником постоянного тока на входе также может быть представлен источником (генератором) напряжения прямоугольной формы. Таким образом, исследуемая схема включает два источника (генератора) напряжения прямоугольной формы, а именно $v_{inv}(t)$ и $v_{rec}(t)$. Эти источники (генераторы) напряжения могут быть выражены по теореме Фурье в следующих гармониках:

$$v_{inv}(t) = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} v_{inv,h} = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} V_{inv,h} \sin(\omega_h t); \quad (105)$$

$$V_{inv,h} = \frac{4}{\pi} V_i \frac{1}{h}; \quad (106)$$

$$\omega_h = h\omega_s; \quad (107)$$

где V_i – источник постоянного тока на входе в преобразователь;

$V_{inv,h}$ – пиковое значение соответствующей гармоники;

$\omega_h = \omega_s = 2\pi f_s, h=1$ – основная угловая частота.

Аналогично, выходное напряжение $v_{rec}(t)$, представляющее собой диодный мост вместе с нагрузкой постоянного тока, описывается соотношением:

$$v_{rec}(t) = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} v_{rec,h} = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} V_{rec,h} \sin(\omega_h t + \delta_h); \quad (108)$$

$$V_{rec,h} = \frac{4}{\pi} V_{dc-bus} \frac{1}{h}; \quad (109)$$

где δ_h – разность фаз между $v_{inv}(t)$ и $v_{rec}(t)$,

$V_{rec,h}$ – пиковое значение соответствующей гармоники.

Для того, чтобы волна суммы гармоник имела прямоугольную форму ($v_{inv}(t)$ и $v_{rec}(t)$), угол каждой гармонической составляющей, согласно анализу Фурье, должен соответствовать угловой частоте ω_h . Отсюда следует, что δ_h можно выразить как:

$$\delta_h = h\delta_1, h > 1; \quad (110)$$

где δ_1 относится к основной гармонике.

Приведённое выше математическое описание позволит изучить систему беспроводной передачи энергии с точки зрения гармонических составляющих. Эквивалентная схема гармоники h -го порядка показана на Рисунок 58.

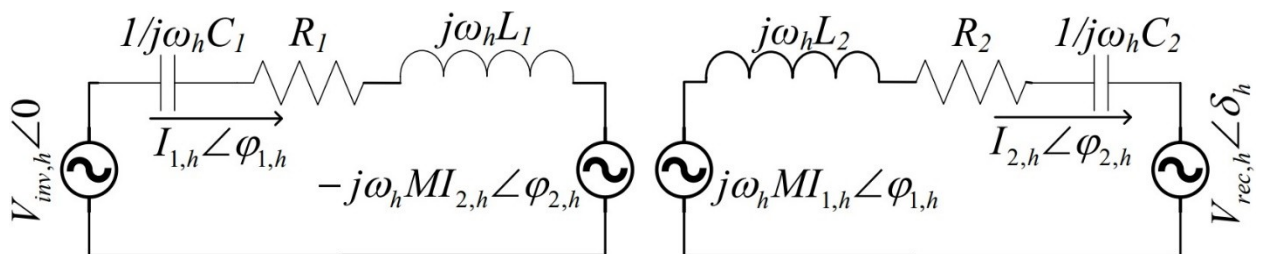


Рисунок 58. – Эквивалентная схема системы беспроводной передачи энергии с последовательной компенсацией гармоники h -го порядка

Источник синусоидального напряжения $V_{inv,h} < 0$ представляет гармонику h -го порядка выходного напряжения высокочастотного

преобразователя в первичном контуре. Резисторы R_1 и R_2 – паразитное сопротивление первичного и вторичного контуров, соответственно. Аналогично, C_1 и C_2 – конденсаторы постоянной ёмкости, L_1 и L_2 – индуктивности катушек. M – взаимная индуктивность. $I_{1,h} < \varphi_{1,h}$ и $I_{2,h} < \varphi_{2,h}$ – гармоники тока h -го порядка (амплитуда и угол) первичного и вторичного контуров, соответственно. Наведённое напряжение во вторичной обмотке, обусловленное током первичной обмотки, описывается соотношением: $j\omega_h M I_{1,h} < \varphi_{1,h}$, а наведённое напряжение в первичной обмотке (за счёт тока вторичной обмотки) характеризуется следующим неравенством: $-j\omega_h M I_{2,h} < \varphi_{2,h}$.

Согласно Рисунок 58, комплексное сопротивление на первичном и вторичном контурах определяются следующим образом:

$$\dot{Z}_{1,h} = R_1 + \frac{1}{j\omega_h C_1} + j\omega_h L_1; \quad (111)$$

$$\dot{Z}_{2,h} = R_2 + \frac{1}{j\omega_h C_2} + j\omega_h L_2; \quad (112)$$

Анализ эквивалентной схемы системы беспроводной передачи энергии можно продолжить применением теоремы о суперпозиции (см. Рисунок 59 и Рисунок 60), из которой вытекают следующие соотношения:

$$I_{11,h} < \varphi_{11,h} = \frac{(V_{inv,h} < 0) \dot{Z}_{2,h}}{M^2 \omega_h^2 + \dot{Z}_{1,h} \dot{Z}_{2,h}}; \quad (113)$$

$$I_{21,h} < \varphi_{21,h} = \frac{j\omega_h^3 C_1 C_2 M (V_{inv,h} < 0)}{\left[-1 - j\omega_h (A_1 + A_2) + \omega_h^2 (A_3 + A_4 + A_1 A_2) + \dot{\imath} j\omega_h^3 (A_1 A_4 + A_2 A_3) + \omega_h^4 (A_3 \right.} \quad (114)$$

$$I_{12,h} < \varphi_{12,h} = \frac{j\omega_h M (V_{rec,h} < \delta_h)}{-M^2 \omega_h^2 - \dot{Z}_{1,h} \dot{Z}_{2,h}}; \quad (115)$$

$$I_{22,h} < \varphi_{22,h} = \frac{j\omega_h C_2 (-1 - j\omega_h A_1 + A_3 \omega_h^2) (V_{rec,h} < \delta_h)}{\left[1 + j\omega_h (A_1 + A_2) - \omega_h^2 (A_3 + A_4 + A_1 A_2) - \dot{\imath} j\omega_h^3 (A_1 A_4 + A_2 A_3) + \omega_h^4 (A_3 \right.} \quad (116)$$

$$A_1 = C_1 R_1, A_2 = C_2 R_2, A_3 = C_1 L_1, A_4 = C_2 L_2, A_5 = C_1 C_2 M^2; \quad (117)$$

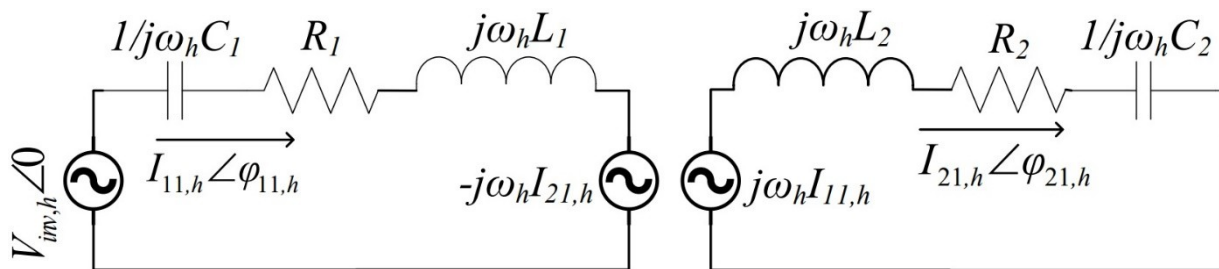


Рисунок 59. – Эквивалентная схема системы беспроводной передачи энергии

без $V_{rec,h} < \delta_h$

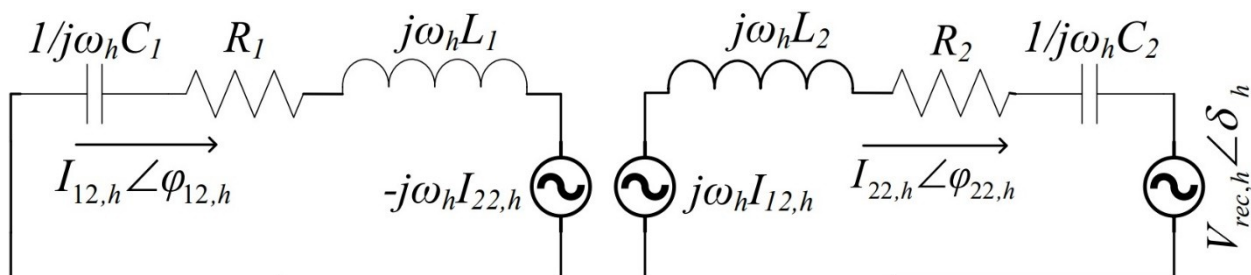


Рисунок 60. – Эквивалентная схема системы беспроводной передачи энергии

без $V_{inv,h} < 0$

Гармоники тока h -го порядка первичного и вторичного контуров описываются следующими соотношениями:

$$I_{1,h} \angle \varphi_{1,h} = I_{11,h} \angle \varphi_{11,h} + I_{12,h} \angle \varphi_{12,h}; \quad (118)$$

$$I_{2,h} \angle \varphi_{2,h} = I_{21,h} \angle \varphi_{21,h} + I_{22,h} \angle \varphi_{22,h}; \quad (119)$$

Суммарно гармоники токов h -го порядка, протекающих через первичную и вторичную обмотки, описываются следующим выражением:

$$i_j(t) = \sum_{h=1,3,5,..}^{\infty} I_{j,h} \sin(h\omega_s t + \varphi_{j,h}); \quad (120)$$

где $j=1,2$ – первичный и вторичный токи, соответственно.

В формулах (127)-(129) угловая характеристика мощности δ_1 является неизвестным параметром, который можно вычислить, поскольку ток $i_2(t)$ становится равным нулю только в интервалах перехода (см. выше о безразрывном режиме). В идеальных диодах переход происходит $\omega_{com} = \pi - \delta_1$. Поэтому угол δ_1 можно рассчитать следующим образом:

$$\sum_{h=1,3,5,..}^{\infty} I_{2,h} \sin(h\omega_s t_{com} + \varphi_{2,h}) = 0; \quad (121)$$

$$\delta_1 = \pi - \omega_s t_{com}, \omega_{com} = \omega_s t_{com}; \quad (122)$$

Значение угловой характеристики мощности δ_1 не может быть получено до тех пор, пока гармонический анализ не будет сделан в полном объёме. Это необходимо для того, чтобы выполнить условие перехода $\varphi_{com} = \pi - \delta_1$ к безразрывному режиму. Использование в расчётах только первой гармоники приводит к значительным погрешностям в вычислении угла δ_1 и, как следствие, передаваемой активной мощности в зависимости от частоты. Поэтому предлагаемое моделирование системы во всём диапазоне гармонических составляющих имеет преимущество перед моделями, основанными на аппроксимации первой гармоники, заключающееся в более точном расчёте угловой характеристики мощности δ_1 и прогнозе передаваемой активной мощности.

На Рисунок 61, где γ_1 – фазовый угол первой (основной) гармоники тока, представлены формы волны (сигнала) напряжения и тока в диодном мосту по схеме, изображённой на Рисунок 57, и с учётом элементов, сведённых в Таблица 23. Согласно результатам моделирования – $f_s = 190 \text{ кГц}$, $V_i = 24 \text{ В}$ и $V_{dc-bus} = 28 \text{ В}$ – разность фаз между $v_{rec,1}$ и $i_{rec,1}$ составляет 10° (при условии, что v_{rec} и i_{rec} одновременно обнулялись во время переходов $\varphi_{com} = \pi - \delta_1$) [100].

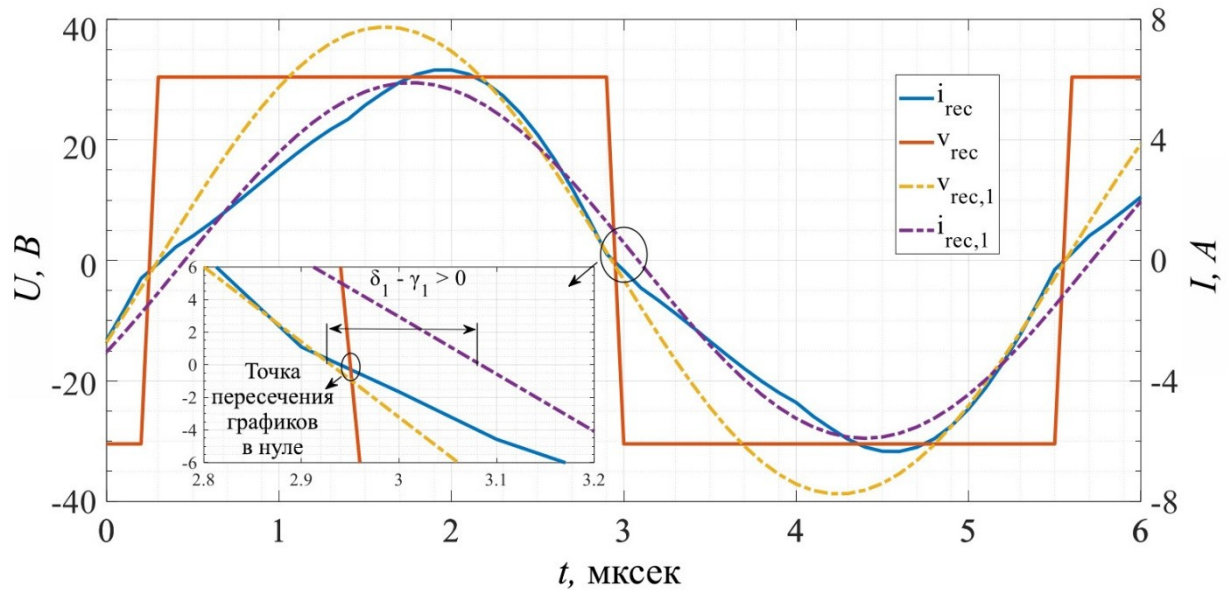


Рисунок 61. – Форма волны (сигнала) напряжения и тока в диодном мосту в первой гармонике и полном спектре гармонических составляющих

Активная мощность (P_{rec}), поступающая в диодный мост, для $j=2$ рассчитывается из формул (117) и (129) следующим образом:

$$P_{rec} = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{V_{rec,h} I_{2,h}}{2} \cos(\delta_h - \varphi_{2,h}); \quad (123)$$

Наконец, активная мощность, подаваемая на шину постоянного тока, рассчитывается как разность P_{rec} и потерь на проводимость диодного моста (потери на переключение не учитываются, поскольку переходы происходят при нулевом токе):

$$P_{out} = P_{rec} - 2\Delta V_{on} I_{out}; \quad (124)$$

где ΔV_{on} – падение напряжение каждого диода,
 I_{out} – выходной ток, поступающий на шину.

Представленная выше математическая модель описывает работу системы беспроводной передачи энергии в безразрывном режиме. Известно, что на значения выходной мощности и резонансной частоты влияет выбор значений индуктивности и ёмкости цепи. Хорошо, когда первичный и вторичный контуры настроены на одну и ту же частоту, но в реальных условиях работы системы беспроводной передачи энергии это не всегда

возможно из-за допусков катушек и конденсаторов этих контуров. Кроме того, на их [катушек и конденсаторов] технические характеристики влияют условия окружающей среды и эксплуатации. В этой работе характеристики выходной мощности системы беспроводной передачи энергии исследуются только для подачи энергии в шину низкого и высокого напряжений (см. Таблица 23). В обоих случаях для расчёта выходной мощности учитываются первые 21 гармоники напряжения и тока, так как влияние других гармонических составляющих ($h > 21$) считается пренебрежимо малым.

Следует отметить, что резонансная частота f_r считается одинаковой как для первичного, так и для вторичного контуров и выражается соотношением:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}; \quad (125)$$

Для определения добротности катушки индуктивности использовался математический аппарат, представленный в работе Г. Гуиди и Дж.А. Суул, в которой рассматривается источник питания постоянного напряжения:

$$Q = \sqrt{Q_1 Q_2} = \sqrt{\frac{2\pi f_r L_1}{R_1} \cdot \frac{2\pi f_r L_2}{R_2}}; \quad (126)$$

При передаче энергии в шину низкого напряжения учитываются следующие технические характеристики:

- уровень напряжения (V_{dc-bus}) составляет 28 В (соответствует типичному уровню напряжения полностью заряженных литий-железо-фосфатных батарей (аккумуляторов) с номинальным напряжением 24 В);
- уровень входного напряжения (V_i) варьируется от 12 В до 36 В из-за относительно низкого уровня мощности распределённых генераторов (коммерческие фотоэлектрические модули);
- резонансная частота f_s варьируется от 160 кГц до 230 кГц (типичные значения резонансной частоты для рассматриваемых уровней мощности).

Таблица 23

**Параметры системы беспроводной передачи энергии
(в шины низкого и высокого напряжений)**

Обозначение	Параметр	Шина низкого напряжения	Шина высокого напряжения
L_1	Индуктивность первичной обмотки	9,25 мкГн	187,73 мкГн
L_2	Индуктивность вторичной обмотки	8,84 мкГн	188,97 мкГн
R_1	Сопротивление первичной обмотки	252 мОм	0,47 Ом
R_2	Сопротивление вторичной обмотки	356 мОм	0,457 Ом
C_1	Ёмкость конденсатора первичного контура	85 нФ	15,495 нФ
C_2	Ёмкость конденсатора вторичного контура	89,5 нФ	15,515 нФ
M	Взаимная индукция	4,066 мкГн	84,3225 мкГн
k	Коэффициент связи	0,449	0,447
f_r	Резонансная частота	180 кГц	93 кГц
C_i	Ёмкость конденсатора на входе	233,5 мкФ	233,5 мкФ
C_{out}	Ёмкость конденсатора на выходе	1000 мкФ	1000 мкФ

При передаче энергии в шину высокого напряжения учитываются следующие технические характеристики:

- уровень напряжения (V_{dc-bus}) составляет 270 В (соответствует уровню напряжения литий-железо-фосфатного аккумулятора для гибридной фотоэлектрической системы);
- уровень входного напряжения (V_i) варьируется от 180 В до 230 В (совместим с преобразователями мощности в небольших ветроустановках и микро-ТЭЦ);
- резонансная частота f_s варьируется от 85 кГц до 110 кГц;
- номинальный уровень мощности составляет 1,2 кВт.

Для проверки результатов математического анализа, в дополнение к имитационному моделированию исследуемой системы в MATLAB/Simulink, была построена экспериментальная установка относительно малой мощности (для передачи энергии на шину низкого напряжения, номинальное напряжение 28 В), принципиальная схема и элементная база которой представлены на Рисунок 62 и в , соответственно.

Для реализации устройства были изготовлены две кольцевые катушки спиралевидной конфигурации, представляющие собой первичную и вторичную обмотки. Согласно статье С. Бандиопадхьяй (и др.) «Сравнение магнитных соединителей для зарядки электромобилей с использованием

многокритериальной оптимизации», 2019 г. спиральная конфигурация улучшает коэффициент связи между двумя катушками. Наружный диаметр обеих катушек составляет 90 мм, расстояние между ними – 12 мм, что приводит к коэффициенту связи, равному 0,449. Для установления требуемого входного напряжения используется источник питания постоянного тока. Управление первичной обмоткой катушки осуществляется посредством полной мостовой схемы (H-образный мост). Мостовой преобразователь работает с модуляцией прямоугольными импульсами. Ко вторичной обмотке подключен полный выпрямительный диодный мост (двухполупериодный выпрямитель), предназначенный для выпрямления индуцированного переменного напряжения. При этом на выходе выпрямителя для стабилизации напряжения используется конденсатор $C_{out} = 1000 \text{ мкФ}$. Экспериментальная установка работает без обратной связи, чтобы подтвердить описанный выше теоретический анализ.

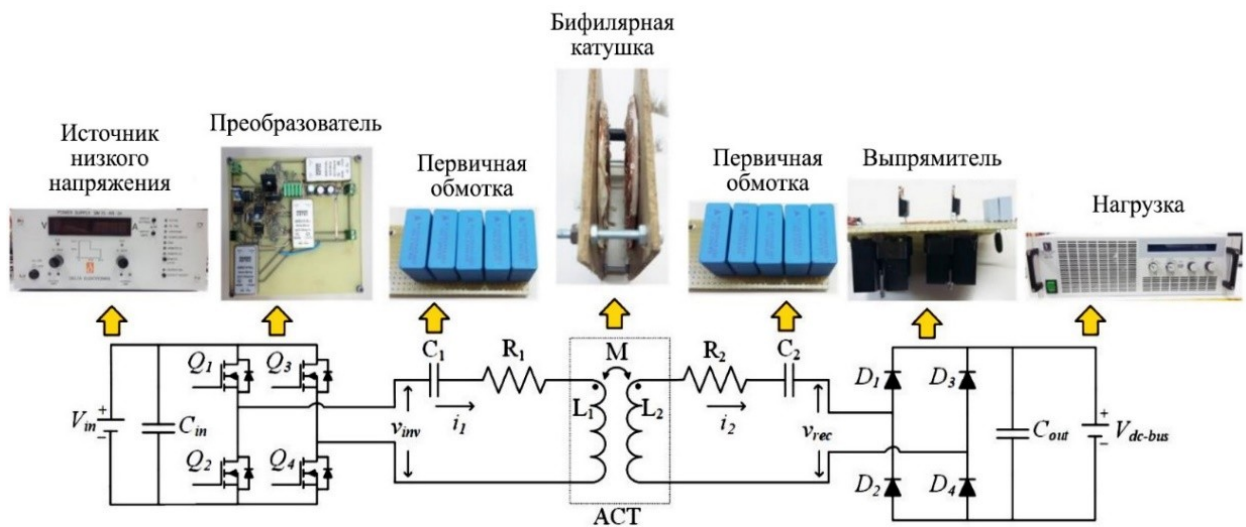


Рисунок 62. – Принципиальная схема экспериментальной установки

Таблица 24

Элементы экспериментальной установки

Обозначение	Наименование	Устройство
$Q_1 - Q_4$	Преобразователь на транзисторах со структурой металл-оксид-полупроводник (МОП-транзистор)	STW69N65M5
$D_1 - D_4$	Ультрабыстрые диоды	VS-HFA15TB60-N3
V_i	Источник низкого напряжения	DELTA ELEKTRONIKA SM 70-AR-24
V_{dc-bus}	Электронная нагрузка	EA-EL 9750-25 2400W 800R

Для сравнения на Рисунок 63 представлены результаты теоретических расчётов, моделирования и эксперимента, касающиеся зависимости выходной мощности P_{out} системы от резонансной частоты f_s . Экспериментальные и имитационные результаты соответствуют теоретическим расчётам, наблюдаемые отклонения обусловлены допущением при вычислениях наличия в цепи элементов, пропускающих ток только в одном направлении (идеальный диодный мост).

По кривым мощности (Рисунок 63) видно, что выходная мощность остаётся достаточно стабильной (по результатам эксперимента её отклонение составило менее 10%), что подтверждает способность системы функционировать в качестве постоянного источника питания.

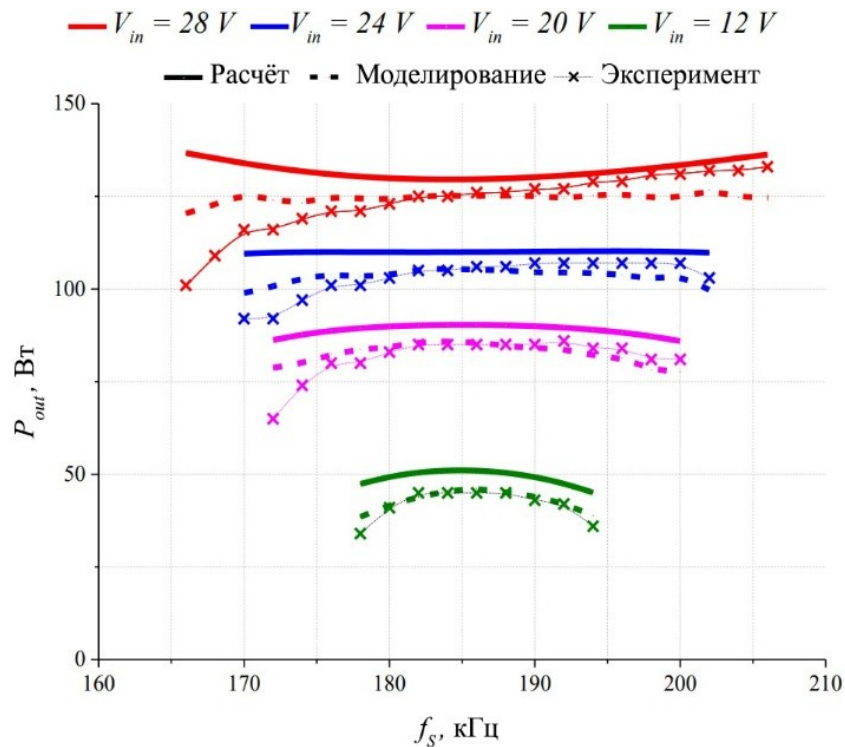


Рисунок 63. – Зависимость выходной мощности системы от резонансной частоты

Стоит отметить, что в диапазоне постоянной выходной мощности выбор резонансной частоты не является критичным, поскольку выходная мощность не зависит ни от рабочей частоты, ни от фактической резонансной частоты обоих контуров. Поэтому любое отклонение, возникшее в значениях параметров этих контуров (из-за допусков катушек и конденсаторов или влияния механизма старения и т.д.), не повлияет на передачу энергии нагрузке в силу непрерывной её выработки в широком диапазоне частот. Таким образом, применение, например, простой проверки выходного напряжения на преобразователе значительно облегчает определение точки максимальной мощности [101]. Кроме того, непрерывный режим выработка энергии является сравнительным преимуществом для распределённых генераторов, питающих микросети постоянного тока. При этом приведённые выше рассуждения могут быть использованы в инженерно-педагогической практике при формировании технического мышления будущих инженеров [102].