

УДК 621.3.077.2:621.3.077.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ТРАНСМИССИИ С ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРЕДАТОЧНЫМ ОТНОШЕНИЕМ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ЗАПАСА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Удалов Сергей Николаевич,

канд. техн. наук, доцент каф. систем электроснабжения предприятий
Новосибирского государственного технического университета, Россия,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: oudalovsn@yandex.ru

Приступ Александр Георгиевич,

канд. техн. наук, доцент каф. электромеханики Новосибирского
государственного технического университета, Россия, 630073,
г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: a_pristup@mail.ru

Ачитаев Андрей Александрович,

аспирант каф. систем электроснабжения предприятий Новосибирского
государственного технического университета, Россия, 630073,
г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: ac-an-alec@mail.ru

Актуальность работы обусловлена тем, что в России более 2/3 территорий не имеет централизованного электроснабжения. Существуют небольшие изолированные энергетические системы, состоящие из нескольких нагрузок, мощностью от 1 до 15 МВт. К сожалению, доля мирового производства малых электростанций небольшой мощности ограничивается 25 %. Другая доля приходится на крупные газотурбинные генераторы, мощностью свыше 20 МВт. Одной из причин ограниченного применения установок малой мощности является их малый запас динамической устойчивости вследствие их малой инерции. Отметим, что нарушение динамической устойчивости возникает при резких изменениях в режиме нагрузки или при коротких замыканиях. Однофазные замыкания наблюдаются в 70 % случаев от общего числа возмущений, которые могут вызвать отключения части нагрузки или электрических генераторов в системе. Это может привести к асинхронному режиму оставшихся генераторов. В данной работе представлен способ поддержания синхронной скорости вращения генератора с помощью электромеханического комплекса на базе магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением в составе с ветроэнергетической установкой малой мощности.

Цель работы: повышение запаса динамической устойчивости энергетических систем с распределенной генерацией, имеющих в своем составе несколько электрических генераторов малой мощности.

Методы исследования: использование метода конечных элементов для анализа геометрии магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением на базе Максвелл 2D; разработка математической модели на базе уравнений магнитных полей для определения вращающего момента и её зависимости от угловой координаты ротора.

Результаты. Получена математическая модель магнитной трансмиссии, из которой следует вывод о взаимосвязи геометрических параметров и величины максимального электромагнитного момента. Была установлена линейная связь между передаточным отношением и скоростью ротора управления. Рассмотрен анализ соотношения чисел пар полюсов в конструкции роторов магнитной трансмиссии и их взаимосвязи между моментами на тихоходном и быстроходном валах. Определена зависимость вращающего момента от углового положения ротора быстроходного звена. Проведен анализ магнитных полей магнитной трансмиссии с целью определения величины потерь в ферромагнитных элементах конструкции.

Ключевые слова:

Ветровая турбина, магнитная трансмиссия, динамическая устойчивость, синхронная машина, математическая модель.

Введение

Сегодня развитие распределенной энергетики в России невозможно без средств, позволяющих повысить регулировочные качества генерирующих устройств. Это связано с тем, что в настоящее время в России распределенная энергетика актуальна в изолированных энергосистемах небольшой мощности. К сожалению, в таких энергосистемах существуют недостатки в виде проблем с электроснабжением, связанные с потерей запаса динамической устойчивости, которые возникают при коротких замыканиях или резких изменениях режима нагрузки.

Параллельная работа генераторов электрических станций, входящих в энергосистему, отли-

чается от работы генераторов на одной станции наличием линий электропередачи, связывающих эти станции. Сопротивления линий электропередачи уменьшают синхронизирующую мощность генераторов и затрудняют их параллельную работу. Кроме того, отклонения от нормального режима работы системы, которые происходят при отключениях, коротких замыканиях, внезапном сбросе или увеличении нагрузки, также могут привести к нарушению устойчивости, что является одной из наиболее тяжелых аварий, приводящей к перерыву электроснабжения потребителей. Поэтому изучение проблемы устойчивости очень актуально.

Постановка проблемы

В изолированной автономной электроэнергетической системе, состоящей из нескольких источников электрической энергии, однофазное замыкание наблюдается в 70 % случаев от общего числа возмущений, которые являются аварийными. Дальнейшие действия связаны с последующим отключением поврежденного генератора или части нагрузки. При этом нарушается баланс выработки и потребления энергии, при котором остальные генераторы не позволяют обеспечить необходимую мощность и частота энергосистемы падает. Также при отключении части нагрузки наблюдается переизбыток активной мощности, что способствует ускорению генераторов. В условиях автономной энергосистемы данный вид нарушений может привести к асинхронному режиму оставшихся в работе синхронных генераторов, которые связаны между собой линиями с разными сопротивлениями. Это приводит к появлению рассогласованности угла нагрузки между ЭДС энергосистемы и ЭДС генераторов.

На данный момент в России имеются серии работ, посвященных проблеме повышения запаса динамической устойчивости синхронных электрических генераторов при условиях работы в изолированных энергетических системах [1–11]. Б.Н. Абрамович [8, 9] предлагает метод поддержания запаса динамической устойчивости, с использованием оценки допустимого уменьшения напряжения. А.С. Яндульский предлагает оценивать динамические характеристики многомашинных электроэнергетических систем на основе данных системы мониторинга переходных режимов [10]. К сожалению, данные подходы не позволяют оценить ситуацию при развитии автономной энергосистемы в перспективе без внедрения дорогостоящих резервов активной мощности. А.Н. Беляев рассматривает применение электромагнитного тормоза для увеличения запаса динамической устойчивости автономной энергосистемы [11]. Однако высокая постоянная времени (от 1 до 5 с) не позволяет обеспечить достаточного быстродействия турбины, так как время изменения угла нагрузки в случае внешних или внутренних возмущений между ЭДС генератора и энергетической системы может составлять десятки доли секунды. За этот период происходит рассогласование угла нагрузки между ЭДС системы и генератора.

Объектом исследования в статье является ветроэнергетическая установка. Ветроэнергетика является технологией, которая обеспечивает потребителей экологически чистой энергией и позволяет формировать уникальные исследовательские задачи. Каждый год в мире устанавливаются и подключаются к энергосистемам большие ветровые турбины [12]. Ветровые турбины не только становятся все более распространенными, но также увеличиваются их габаритные размеры и единичная мощность. Эффект масштаба, который связан с энергией ветра толкает производителей с каждым годом выпускать большие турбины. Улуч-

шения в технологии производства ветровых турбин позволили генераторам масштабироваться до величины, превышающей 10 МВт [13]. В качестве электрических генераторов для таких ветроэнергетических установок можно использовать только синхронные генераторы [14]. Но при подключении к энергосистеме, состоящей из нескольких генераторов, проблемой является потеря запаса динамической устойчивости системы электроснабжения, которое возникает при резких изменениях режима нагрузки или при коротких замыканиях на генераторах или в составе нагрузки [15].

Современная ветроэнергетическая установка состоит из трех основных компонентов (рис. 1, 2): ветровой турбины, генератора и планетарной трансмиссии [16].

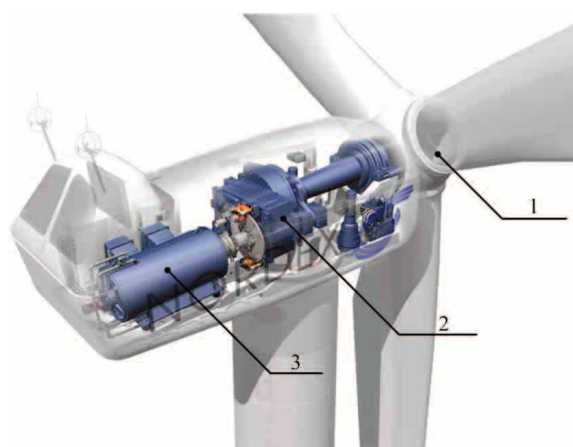


Рис. 1. Компоненты современной ветроэнергетической установки NORDEX: 1 – турбина; 2 – трансмиссия; 3 – генератор

Fig. 1. Arrangement of a modern wind-driven generator NORDEX: 1 is the turbine; 2 is the transmission; 3 is the generator

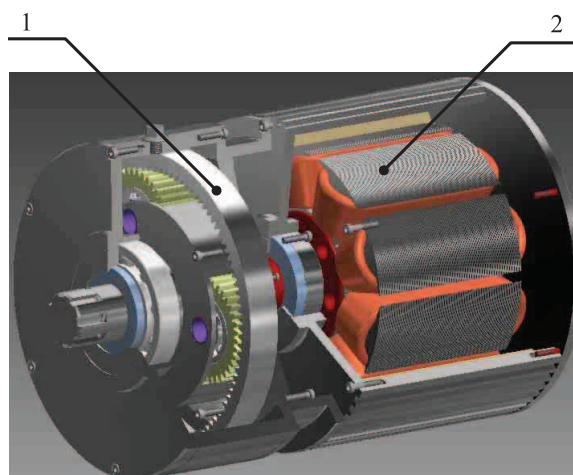


Рис. 2. Электромеханическая компоновка: 1 – планетарная трансмиссия; 2 – генератор

Fig. 2. Electromechanical arrangement: 1 is the planetary transmission; 2 is the generator

К недостаткам статической планетарной трансмиссии можно отнести постоянный передаточный коэффициент, не позволяющий управлять скоро-

стью генератора, высокие эксплуатационные издержки, акустический шум, трение [17].

Предлагаемое решение

Данная работа предлагает решение, которое состоит в использовании технологии псевдо-прямого привода [16–25]. Суть разработки заключается в замещении планетарной механической трансмиссии магнитным редуктором с переменным передаточным отношением. Рис. 4 и 5 показывают схематично предложенную магнитную трансмиссию с переменным передаточным отношением. Магнитная трансмиссия является устройством для преобразования момента между двух вращающихся частей с различным числом постоянных магнитов через модулирующие ферромагнитные сегменты на тихоходном валу. Они позволяют менять скорость вращения тихоходного вала в зависимости от заданного числа пар полюсов ферромагнитных сегментов.

Переменное передаточное отношение осуществляется путем действия обмотки управления (рис. 3), которая обеспечивает изменение скорости вращения ротора управления передаточным отношением и, влияя на скорость тихоходного и быстроходного валов, изменяет скорость на генераторе. Обращаем внимание, что в схеме отсутствует инвертор в силовой части цепи (рис. 3). Для реализации управления применяются два инвертора, рассчитанные на значительно меньшую мощность, чем инвертор между генератором и системой. Они обеспечивают преобразование частоты для заряда аккумуляторных батарей и питания обмотки управления.

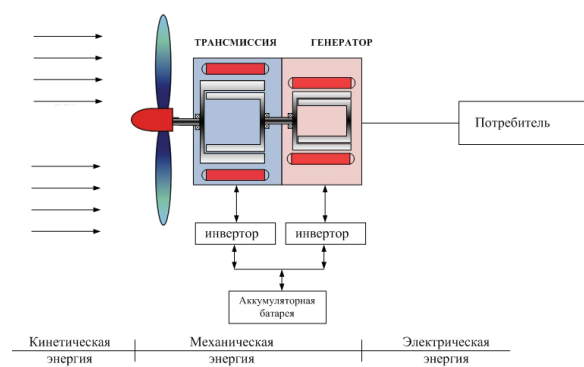


Рис. 3. Компоновка ветроэнергетической установки на базе магнитной трансмиссии и синхронного генератора

Fig. 3. Arrangement of a wind-driven generator based on magnetic transmission and synchronous generator

Сравнивая магнитную трансмиссию и механическую планетарную можно выделить для магнитной трансмиссии высокую плотность выходного момента, которая может превышать $100 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ благодаря использованию постоянных магнитов из редкоземельных металлов [16, 18]. Также, по причине отсутствия механического контакта между вращающимися частями, у магнитной трансмиссии высокий КПД [19, 20]. Идея магнитной трансмиссии возникла еще в начале 20 в. Примером может служить патент США в 1913 г., описывающий электромагнитную передачу, состоящую из двух

вращающихся валов со стальными явновыраженными полюсами [21]. Два вала соединены через взаимодействие постоянных магнитов с разным числом полюсов. Такая топология предусматривает практически полное отсутствие шума и высокий КПД. К сожалению, тогда она не нашла коммерческого применения, и идея была забыта [22].

Данная статья посвящена исследованию магнитной трансмиссии с целью ее использования в ветроэнергетической установке. Геометрия магнитной трансмиссии представлена на рис. 5. Геометрические параметры магнитной трансмиссии представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры предлагаемой магнитной трансмиссии
Table 1. Parameters of the proposed magnetic transmission

Параметр/Parameter	Значение/Value	
Осевая длина/Axial length	800	мм mm
Радиус статора звена управления Control link stator radius	830	
Внутренний радиус статора звена управления Inner radius of control link stator	631	
Внешний радиус ротора управления Outer radius of control rotor	600	
Высота постоянных магнитов Permanent magnet height	60	
Внешний диаметр быстроходного звена Outer diameter of a high-speed element	384	об/мин rev/min
Номинальная скорость быстроходного звена Nominal speed of a high-speed element	750	
Номинальная скорость тихоходного звена Nominal speed of a low-speed element	170	

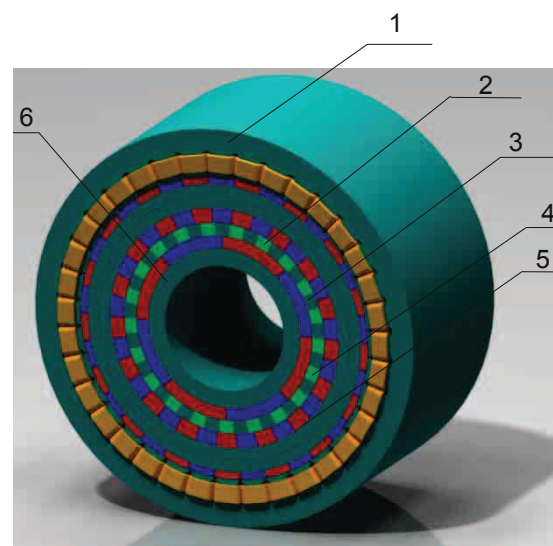


Рис. 4. Эскиз магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением: 1 – обмотка управления; 2 – немагнитная вставка; 3 – модулирующее кольцо из ферромагнитных сегментов; 4 – тихоходное звено; 5 – ротор управления с постоянными магнитами; 6 – быстроходное звено

Fig. 4. Draft of magnetic transmission with variable gear ratio: 1 is the control winding; 2 is the non-magnetic insert; 3 is the modulate ring of ferromagnetic sections; 4 is the low-speed element; 5 is the control rotor with permanent magnets; 6 is the high-speed element

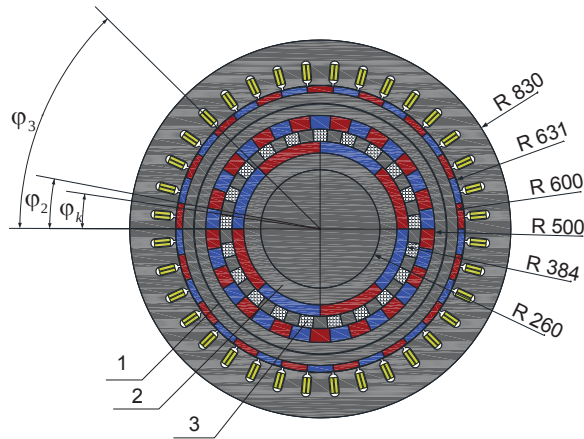


Рис. 5. Основная компоновка геометрии машины: 1 – ротор управления; 2 – быстроходное звено; 3 – модулирующее кольцо

Fig. 5. The main arrangement of the device geometry: 1 is the control rotor; 2 is the high-speed element; 3 is the modulate ring

Математическое описание магнитной трансмиссии

Ферромагнитные сегменты тихоходного звена модулируют магнитное поле в воздушном зазоре между внутренним быстроходным ротором с постоянными магнитами и внешним ротором управления с постоянными магнитами. При отсутствии управления величина передаточного отношения равна отношению числа пар полюсов ротора управления к числу пар полюсов внутреннего быстроходного ротора [23, 24].

Обозначим: p_1 – число пар полюсов обмотки управления наружной системы магнитов управляемого ротора; p_2 – число пар полюсов внутренней системы магнитов управляемого ротора; p_k – число ферромагнитных полюсов модулирующего кольца, являющегося тихоходным звеном трансмиссии; p_3 – число пар полюсов быстроходного ротора.

Магнитодвижущая сила внутренней магнитной системы внешнего ротора управления, которая выражается уравнением (1) вращается со скоростью ω_2 и содержит постоянные магниты с числом пар полюсов p_2 :

$$F_2 = F_{2m} \cos(p_2\theta - p_2\omega_2 t + p_2\varphi_2), \quad (1)$$

где F_{2m} – амплитуда основной гармоники магнитодвижущей силы; θ – угловая координата; φ_2 – начальное угловое положение (рис. 5).

С другой стороны, создаваемая магнитодвижущая сила, вращающаяся со скоростью ω_3 и имеющая число пар полюсов p_3 на быстроходном роторе [23]:

$$F_3 = F_{3m} \cos(p_3\theta - p_3\omega_3 t + p_3\varphi_3),$$

где F_{3m} – амплитуда основной гармоники магнитодвижущей силы; φ_3 – начальное угловое положение.

Ограничиваясь постоянной составляющей и основной гармоникой, можно записать магнитную

проводимость вращающегося модулирующего кольца с числом пар полюсов p_k как:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_{1m} \cos(p_k\theta - p_k\omega_k t + p_k\varphi_k),$$

где λ_0 и λ_{1m} – постоянная составляющая и амплитуда первой гармоники магнитной проводимости λ соответственно, φ_k – начальное угловое положение.

Магнитная индукция, создаваемая F_2 :

$$B_2 = \lambda F_2 = B_{21} + B_{22} + B_{23},$$

где

$$B_{21} = \lambda_0 F_{2m} \cos(p_2\theta - p_2\omega_2 t + p_2\varphi_2), \quad (2)$$

$$B_{22} = \frac{1}{2} \lambda_{1m} F_{2m} \times \cos[(p_k - p_2)\theta + p_2\omega_2 t - p_k\omega_k t + p_k\varphi_k - p_2\varphi_2],$$

$$B_{23} = \frac{1}{2} \lambda_{1m} F_{2m} \times \cos[(p_k + p_2)\theta - p_2\omega_2 t - p_k\omega_k t + p_k\varphi_k + p_2\varphi_2]. \quad (3)$$

Магнитная индукция, создаваемая магнитодвижущей силой F_3 :

$$B_3 = \lambda F_3 = B_{31} + B_{32} + B_{33},$$

где

$$B_{31} = \lambda_0 F_{3m} \cos(p_3\theta - p_3\omega_3 t + p_3\varphi_3), \quad (4)$$

$$B_{32} = \frac{1}{2} \lambda_{1m} F_{3m} \times \cos[(p_k - p_3)\theta + p_k\omega_k t + p_3\omega_3 t + p_k\varphi_k - p_3\varphi_3],$$

$$B_{33} = \frac{1}{2} \lambda_{1m} F_{3m} \times \cos[(p_k + p_3)\theta - p_k\omega_k t - p_3\omega_3 t + p_k\varphi_k + p_3\varphi_3]. \quad (5)$$

Для магнитного редуктора, работающего на принципе модуляции кривой индукции в воздушном зазоре должны выполняться следующее соотношение [23]:

$$p_2 + p_3 = p_k, \quad (6)$$

Из выражений (2) и (5) с учетом (6) следует, что компонента B_{21} магнитного поля, производимая внешним ротором управления, и компонента B_{32} магнитного поля, производимая внутренним быстроходным ротором, будет иметь совпадающее число пар полюсов, равное p_2 , и будет вращаться с одинаковой угловой частотой. Аналогично из уравнений (3) и (4) следует, что компонента B_{22} магнитного поля, производимая внешним ротором управления, и компонента B_{31} магнитного поля, производимая внутренним ротором, также будут иметь совпадающее число пар полюсов p_3 и будут вращаться с одинаковой угловой скоростью. Таким образом, указанные компоненты магнитного поля будут создавать постоянный электромагнитный момент между двумя роторами.

Магниты на внутренней поверхности звена управления передаточным отношением могут быть представлены как токовый слой, распределенный по поверхности:

$$J_2 = \frac{dF_2}{d\theta} = -p_2 F_{2m} \sin(p_2 \theta - p_2 \omega_2 t + p_2 \varphi_2). \quad (7)$$

Вращающий момент внешнего ротора управления является результатом взаимодействия магнитного потока постоянных магнитов на входном роторе и эквивалентного поверхностного тока на внешнем роторе управления и может быть записан следующим выражением:

$$M_2 = \int_0^{2\pi} [J_2 \times B_{32} \mathbb{I}_a R d\theta], \quad (8)$$

где R – радиус; l_a – длина магнитной трансмиссии. После подстановки (7) и (5) в (8) и интегрирования получаем:

$$M_2 = -p_2 M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3),$$

где p_2 – число пар полюсов внешнего ротора управления; p_k – число ферромагнитных сегментов на тихоходном звене; p_3 – число пар полюсов быстроходного ротора; M_m – амплитудное значение момента, которое выражается соотношением:

$$M_m = \frac{\pi}{2} \lambda_{1m} F_{2m} F_{3m} l_a R l_a.$$

M_m зависит от геометрических параметров трех роторов трансмиссии и свойств магнитов и ферромагнитных материалов.

Аналогичным образом получается соотношение для момента, действующего на быстроходный ротор с числом пар полюсов p_3 :

$$M_3 = -p_3 M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3).$$

В установившемся состоянии угол нагрузки $\varphi_k = p_2 \varphi_2 - p_k \varphi_k + p_3 \varphi_3$ должен быть постоянным, следовательно:

$$\frac{d(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3)}{dt} = 0$$

$$\text{или } (p_k \omega_k - p_2 \omega_2 - p_3 \omega_3) = 0,$$

где ω_2 , ω_k , ω_3 – механические угловые скорости звена управления, тихоходного и быстроходного валов соответственно.

Передаточное отношение между входным и выходным валами получается:

$$G(\omega_2) = \frac{\omega_k}{\omega_3} = \frac{p_3}{p_k} + \frac{p_2}{p_k} \frac{\omega_2}{\omega_3}. \quad (9)$$

Таким образом, управляя скоростью внешнего ротора (ротора управления) ω_2 по отношению к входной скорости ротора ω_3 , передаточное отношение между входным и выходным ротором может регулироваться. Моменты M_2 , M_k и M_3 , действующие на роторы соответственно, могут быть получены при условии пренебрежения потерями. Тогда можно записать:

$$\begin{aligned} M_2 + M_k + M_3 &= 0; \\ \omega_2 M_2 + \omega_k M_k + \omega_3 M_3 &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

На основании этого получается момент на быстроходном валу:

$$M_k = p_k M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3).$$

Если прикладывать внешний момент к ротору управления $M_{упр}$, к быстроходному $M_{быстр}$ и тихоходному валу $M_{тих}$ соответственно, система уравнений динамики электромеханического преобразователя будет иметь вид:

$$\begin{cases} J_{упр} \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} = \\ = M_{упр} - p_2 M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3) \\ J_{быстр} \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} = \\ = M_{быстр} - p_3 M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3) \\ J_{тих} \frac{d^2 \varphi_k}{dt^2} = \\ = M_{тих} + p_k T_{max} \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3), \end{cases} \quad (11)$$

где $J_{тих}$, $J_{быстр}$, $J_{упр}$ – момент инерции тихоходного, быстроходного звена и внешнего ротора управления соответственно. Примем в качестве допущения в уравнениях (11) отсутствие потерь в магнитной системе и потерь на трение.

Полевые исследования магнитной трансмиссии методом конечных элементов

В целях определения параметров режима работы магнитной трансмиссии применен метод конечных элементов. С помощью программного комплекса Maxwell рассчитана характеристика вращающего момента от угла положения быстроходного звена в 2D-постановке. На рис. 6 представлены результаты расчета угловой характеристики и отображен регулировочный диапазон области возможного изменения передаточного отношения трансмиссии. Была проведена серия расчетов по изменению положения ротора быстроходного звена. Рис. 7 демонстрирует распределение магнитной индукции при фиксированном положении ротора управления. На рис. 8 показано распределение магнитной индукции при вращении ротора управления и быстроходного звена.

На основании уравнения (9) следует линейный закон изменения передаточного отношения в зависимости от скорости вращения ротора управления [25]. Рис. 9 отображает изменение передаточного отношения как функцию от скорости ротора управления при скорости быстроходного вала, равной 750 об/мин. Как видно, передаточное отношение становится меньшим, когда скорость ротора управления уменьшается и, наоборот, становится больше при увеличении скорости ротора управления [22, 23]. Когда передаточное отношение равно 1, все три ротора вращаются с некоторой скоростью и действующая входная механическая мощность равна нулю. Когда передаточное отношение не равно 1, обмотка управления будет питать аккумулятор или наоборот потреблять энергию из аккумулятора. Все зависит от передаточного отношения,

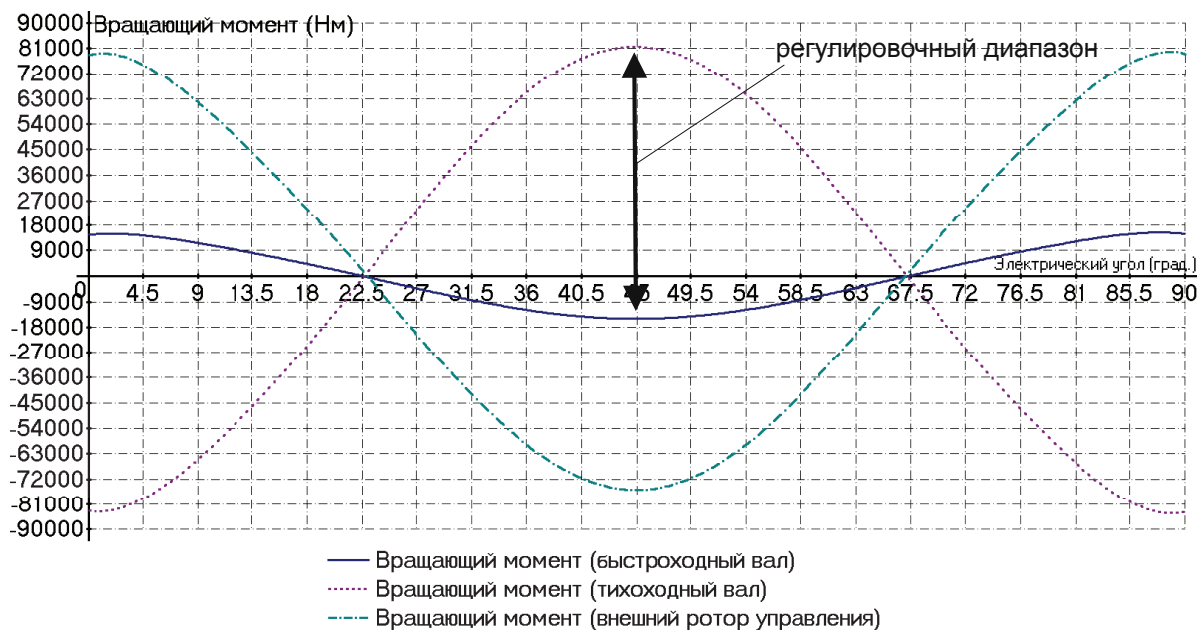


Рис. 6. Угловая характеристика магнитной трансмиссии

Fig. 6. Power-angle curve of magnetic transmission

которое может быть большим или меньшим чем 1 и направления передачи мощности между входным и выходным роторами. Следует отметить, что единичное передаточное отношение соответствует нормальному статическому режиму трансформации скорости тихоходного и быстроходного валов. На рис. 10 представлен расчет вращающего момента при условии вращения тихоходного вала и быстроходного вала с их номинальными скоростями. По величине знаков следует, что направление вращения происходит в разные стороны, что подтверждается уравнением (10).

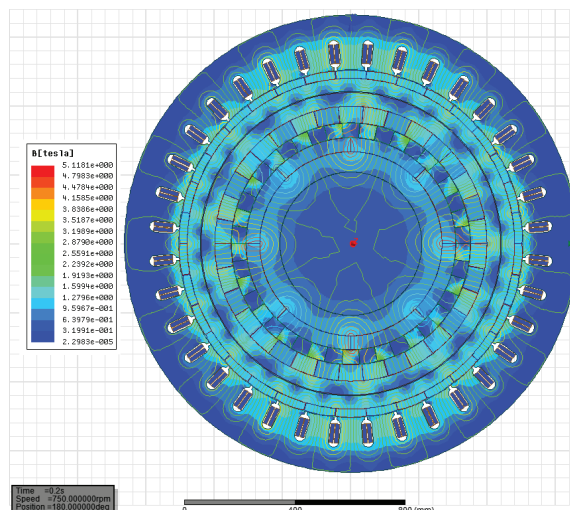


Рис. 7. Распределение магнитного поля в ядре электро-механического комплекса при фиксированном положении внешнего ротора управления

Fig. 7. Magnetic field distribution in the armature of electro-mechanical complex at fixed setting of outer control rotor

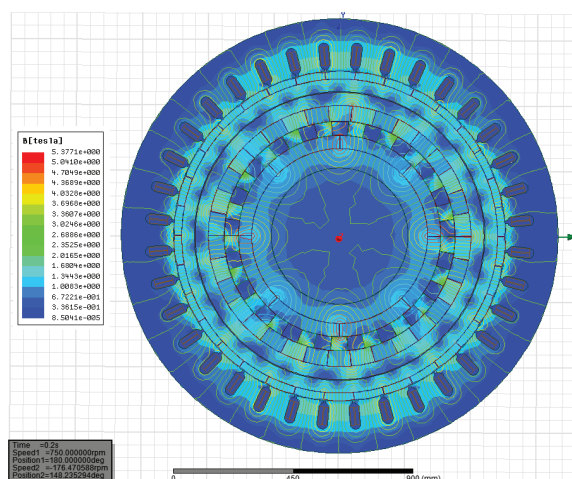


Рис. 8. Распределение магнитного поля при условии вращения с номинальной скоростью внешнего ротора управления и быстроходного вала

Fig. 8. Magnetic field distribution at rotation of outer control rotor and high speed shaft with nominal speed

Расчет потерь в стали

Потери в ферромагнитных ядрах роторов и элементах модулирующего кольца являются важным критерием эффективности трансмиссии. Примененный метод конечных элементов позволяет рассчитать потери в стали. После получения кривых изменения магнитной индукции для каждого конечного элемента производится разложение в ряд Фурье. Затем потери интегрируются, а именно потери на вихревые токи P_e (12) и потери на гистерезис P_h (13), поэтому могут быть выражены как [17]:

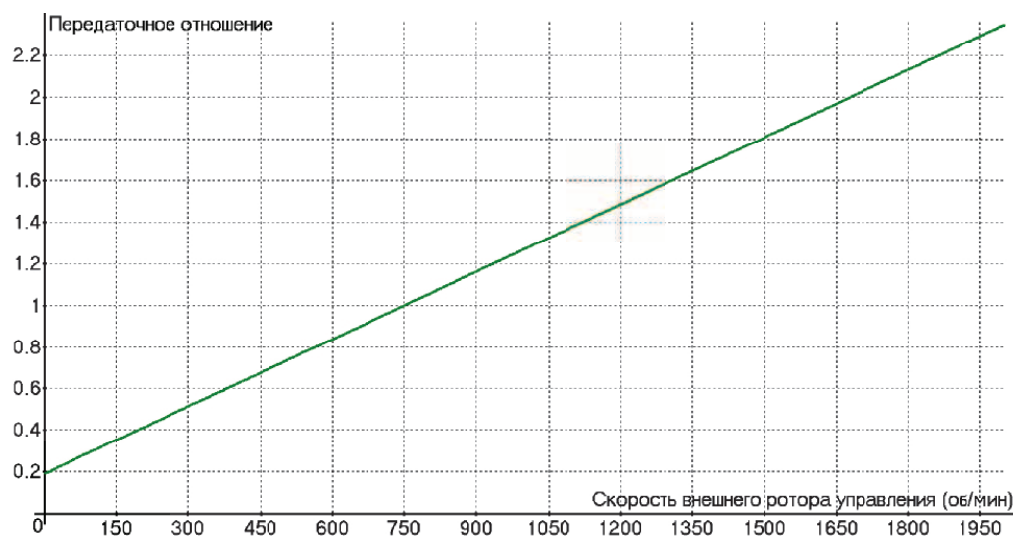


Рис. 9. Зависимость передаточного отношения от скорости вращения внешнего ротора управления

Fig. 9. Dependence of gear ratio on rotation rate of the outer control rotor

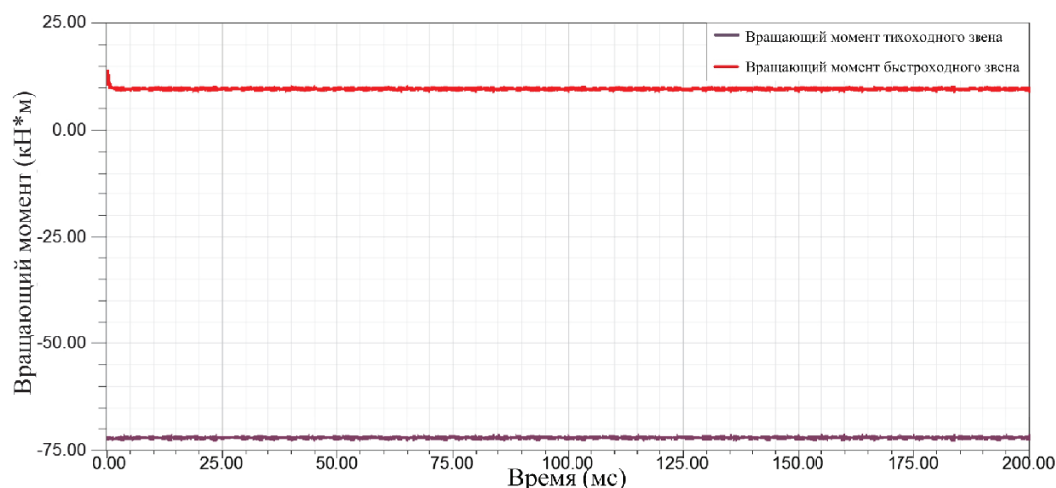


Рис. 10. Результаты расчета вращающего момента магнитной трансмиссии при условии вращения внешнего ротора управления с номинальной скоростью

Fig. 10. Results of calculation of the magnetic transmission torque at the outer control rotor rotation at nominal speed

$$P_e = \oint \sum_n \rho K_e (nf)^2 (B_{nr}^2 + B_{nt}^2) dV, \quad (12)$$

$$P_h = \oint \sum_n \rho K_h (nf) (B_{nr}^2 + B_{nt}^2) dV, \quad (13)$$

где ρ – плотность металла сердечника; n означает порядок гармоники; f – частота перемагничивания; V – объем якоря сердечника; B_{nr} и B_{nt} – радиальная и тангенциальная компонента n -й гармоники и K_e , K_h – коэффициенты потерь в железе сердечника. В табл. 2 представлены основные параметры постоянных магнитов и электротехнической стали.

На рис. 11, 12 представлены графики распределения радиальных и тангенциальных составляющих гармоник индукции магнитного поля вдоль воздушного зазора между наружным ротором управления и ферромагнитными сегментами и внутренним быстроходным ротором и ферромагнитными сегментами.

Таблица 2. Параметры магнитного состояния постоянных магнитов и стали

Table 2. Parameters of magnetic state of permanent magnets and steel

Параметр/Parameter	Значение Value
Относительная магнитная проницаемость магнитов Relative magnetic permeability	1,0998
Объемная проводимость постоянных магнитов Bulk conductivity of permanent magnets	625000 см/м (cm/m)
Плотность постоянных магнитов Permanent magnet density	7400 кг/м ³ (kg/m ³)
Плотность электротехнической стали Electric steel density	7820 кг/м ³ (kg/m ³)
Коэффициент заполнения магнитопровода Magnetic core load factor	0,95
K_e	0,91
K_h	366
Материал постоянных магнитов Permanent magnet material	NbFeB-35

Из расчетов следует, что в ферромагнитных элементах в данном варианте геометрии магнитной трансмиссии потери составляют 8 кВт, что не превышает 2 % от полной мощности машины, равной 1,2 МВт. Отметим, что в конструкции машины отсутствуют короткозамкнутые контура, где имели бы место вихревые токи и создавался нагрев со значительной потерей КПД.

Выводы

В результате проведенных исследований получено математическое описание, позволяющее анализировать динамические процессы в магнитной

трансмиссии. Методом численного моделирования были получены основные характеристики магнитной трансмиссии. Анализ расчета механической характеристики позволяет сделать вывод о взаимосвязи между геометрией магнитной трансмиссии, скорости вращения роторов и передаточным отношением. Также линейный характер связи передаточного отношения и скорости вращения ротора управления говорит о широком изменении скоростей тихоходного и быстроходного валов в пределах заданной мощности звена управления трансмиссией. Взаимосвязь между максимальным крутящим моментом на быстроходном валу и геоме-

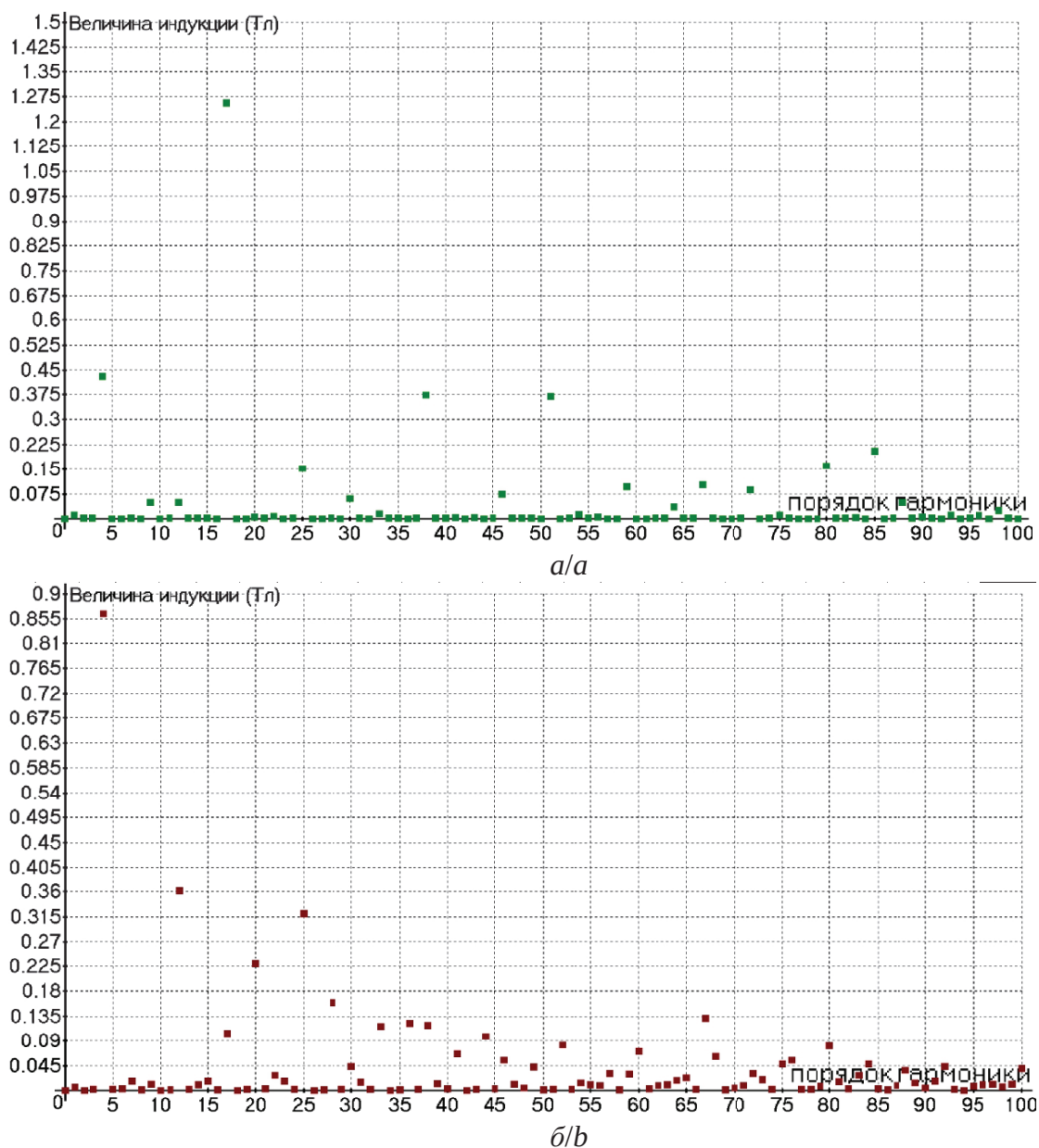


Рис. 11. Распределение радиальных составляющих гармоник плотности магнитного поля вдоль воздушного зазора между модулирующими сегментами и: а) верхним ротором управления; б) быстроходным ротором

Fig. 11. Distribution of radial components of magnetic field density harmonics along air gap between modulate segments and: а) upper control rotor; б) high speed rotor

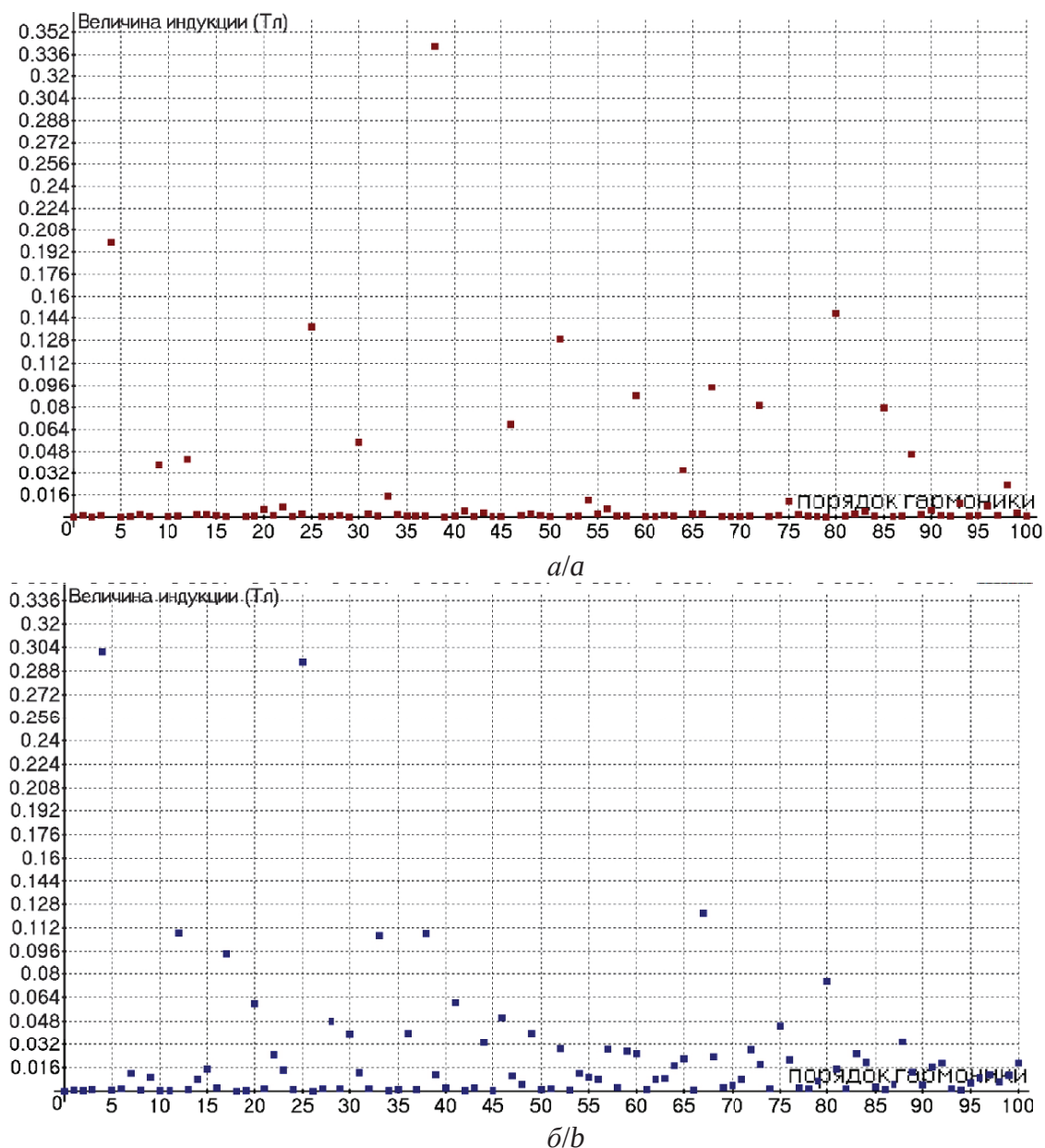


Рис. 12. Распределение тангенциальных составляющих гармоник плотности магнитного поля вдоль воздушного зазора между модулирующими сегментами и: а) верхним ротором управления; б) быстроходным ротором

Fig. 12. Distribution of tangential components of magnetic field density harmonics along air gap between modulate segments and: a) upper control rotor; b) high speed rotor

трическими параметрами машины позволяет сделать вывод о возможности создания методики проектирования магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением с учетом конкретных технических требований. Анализ результатов полевых расчетов магнитного поля показал, что

возможна передача механической энергии от тихоходного вала к быстроходному при минимальных энергетических потерях в силу отсутствия короткозамкнутых контуров, где возможны проявления вихревых токов, которые создают перегрев и потерю КПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голов П.В., Шаров Ю.В., Строев В.А. Система математических моделей для расчета переходных процессов в сложных электроэнергетических системах // *Электричество*. – 2007. – № 5. – С. 2–11.
2. Енин В.Н., Степанов А.В. Моделирование переходных процессов и анализ динамической устойчивости синхронных генераторов при воздействии больших возмущений // *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*. – 2012. – № 10. – С. 495–504.
3. Криворот А.В. Неоднозначное влияние распределенной генерации на динамическую устойчивость в распределительной сети при тяжелых возмущениях // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Междунар. науч. семинар им. Ю.Н. Руденко*. – Иркутск, 2014. – С. 156–163.
4. Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В. Расчет и анализ динамической устойчивости узлов нагрузки промышленных предприятий с собственными электростанциями // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2006. – № 4. – С. 94–98.
5. Расчет динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей промышленных предприятий с целью анализа устойчивости систем электроснабжения / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2006. – № 2. – С. 71–75.
6. Представление машин переменного тока в расчетах динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / Б.И. Заслав, В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. – 2008. – № 11 (111). – С. 3–8.
7. Кирпиченкова В.Я. Влияние канала регулирования частоты вращения вала асинхронизированного синхронного электро-механического преобразователя частоты на стохастическую устойчивость межсистемной гибкой связи // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2007. – № 5. – С. 38–43.
8. Динамическая устойчивость электро-механических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи / Б.Н. Абрамович и др. // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. – 2011. – № 3. – С. 17–25.
9. Активная компенсация провалов и искажений напряжения в системах электроснабжения нефтедобывающих предприятий / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов, А.Я. Шклярский // *Промышленная энергетика*. – 2012. – № 4. – С. 23–25.
10. Яндульский А.С., Марченко А.А., Нестерко А.Б. Оценка динамических характеристик многомашинных электроэнергетических систем на основе данных системы мониторинга переходных режимов // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. – 2014. – № 4. – С. 1–9.
11. Беляев А.Н. Повышение динамической устойчивости автономных энергосистем нефтегазодобывающих комплексов на основе электрического торможения // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. – 2008. – № 63. – С. 163–169.
12. Альдо В. да Роза. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы. – М.: ИД «Интеллект», МЭИ, 2010. – 704 с.
13. Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 458 с.
14. Удалов С.Н., Манусов В.З. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 200 с.
15. Анализ переходных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем составе объекты малой энергетики / О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов // *Промышленная энергетика*. – 2010. – № 4. – С. 22–28.
16. Comparative study between mechanical and magnetic planetary gears / E. Gouda et al. // *Magnetics, IEEE*. – 2011. – Т. 47. – № 2. – P. 439–450.
17. Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies / L. Jian et al. // *Magnetics, IEEE*. – 2009. – Т. 45. – № 10. – P. 4526–4529.
18. A novel «Pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machine / K. Atallah et al. // *Magnetics, IEEE Transactions on*. – 2008. – Т. 44. – № 11. – P. 4349–4352.
19. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears // *Mechatronics, IEEE/ASME* – 2012. – Т. 17. – № 2. – P. 269–278.
20. Polinder H. Trends in Wind Turbine Generator Systems // *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*. – 2013 September. – V. 1. – № 3. – P. 174–185.
21. Neuland A.H. Apparatus for transmitting power. US Patent 1171351, Feb. 1916.
22. Development of a high-performance magnetic gear / P.O. Rasmussen et al. // *Industry Applications, IEEE*. – 2005. – Т. 41. – № 3. – P. 764–770.
23. Peng S., Fu W.N., Ho S.L. A Novel High Torque-Density Triple-Permanent-Magnet-Excited Magnetic Gear // *Magnetics, IEEE*. – 2014. – Т. 50. – № 11. – P. 1–4.
24. Aho J.P., Kraft L.G. Control of a Wind Turbine with a Magnetic Continuously Variable Transmission for Mitigation of Torque Variations // *Proc. of the 2011 AIAA/ASME Wind Symposium*. – USA, Orlando, 2011. – 28 p.
25. Wang J., Atallah K., Carvley S.D. A magnetic continuously variable transmission device // *Magnetics, IEEE*. – 2011. – Т. 47. – № 10. – P. 2815–2818.

Поступила 10.05.2015.

UDC 621.3.077.2:621.3.077.3

RESEARCH OF MAGNETIC TRANSMISSION WITH VARIABLE GEAR RATIO IN A WIND-DRIVEN GENERATOR FOR IMPROVING DYNAMIC STABILITY STOKE

Sergey N. Udalov,

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Prospect, Novosibirsk,
630073, Russia. E-mail: oudalovsn@yandex.ru

Alexander G. Pristup,

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Prospect, Novosibirsk,
630073, Russia. E-mail: a_pristup@mail.ru

Andrey A. Achitaev,

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Prospect, Novosibirsk,
630073, Russia. E-mail: ac-an-alec@mail.ru

The relevance of the research is caused by the fact that in Russia more than 2/3 of the territories is not provided with centralized power supply. There are small isolated energy systems, consisting of several loads of 1 to 15 MW. Unfortunately, the share of world production of small power stations is limited to 25 %. Another share falls on large turbine generators, power over 20 MW. One of the reasons for limited use of small power plants is their small stock of dynamic stability due to their low inertia. Let us mention that the dynamic stability is disturbed when sudden changes occur in load conditions or at short circuits. Single-phase circuits are observed in 70 % of the total number of disturbances that may cause disconnection of a load part or electric power generators in the system. This can result in asynchronous mode of the remaining generators. The paper introduces the method for maintaining a synchronous speed of a generator rotation by means of electromechanical complex based on magnetic transmission with variable gear ratio as a part of a low-power wind-driven generator.

The main aim of the study is to increase the dynamic stability stock of power systems with distributed generation, having in its composition several low-power electric generators.

The methods. The finite element method is used for geometry analysis of magnetic transmission with variable gear ratio on the basis of Maxwell 2D. The mathematical model based on magnetic fields equations was developed to determine the torque and its dependence on a rotor angular point.

The results. The authors have obtained the mathematical model of magnetic transmission. It leads to the conclusion that there is the relationship of geometrical parameters and the magnitude of the maximum electromagnetic torque. The linear relationship was established between the transmission ratio and rotor control speed. The paper considers the analysis of the pole pair numbers ratio in the rotor magnetic transmission construction and their interconnection between the moments on slow and high-speed shafts. The author determined the dependence of the torque on the angular position of the high-speed link rotor and analyzed the magnetic fields of magnetic transmission to define the magnitude of losses in ferromagnetic yokes.

Key words:

Wind turbine, magnetic transmission, dynamic stability, synchronous machine, mathematical model.

REFERENCES

1. Golov P.V., Sharov Yu.V., Stroyev V.A. Sistema matematicheskikh modeley dlya rascheta perekhodnykh protsessov v slozhnykh elektroenergeticheskikh sistemakh [Mathematical Models for Transients Simulation in Electrical Power Systems]. *Electricity*, 2007, no. 5, pp. 2–11.
2. Enin V.N., Stepanov A.V. Modelirovanie perekhodnykh protsessov i analiz dinamicheskoy ustoychivosti sinkhronnykh generatorov pri bolshikh vozmushcheniyakh [Simulation of transient and dynamic stability analysis of synchronous generators when exposed to large perturbations]. *Nauka i obrazovanie*, 2012, no. 10, pp. 495–504.
3. Krivorot A.V. Neodnoznachnoe vliyanie raspredelennoy generatsii na dinamicheskuyu ustoychivost v raspredelennoy seti pri tyazhelykh vozmushcheniyakh [Ambiguous impact of distributed generation on the dynamic stability of the distribution network in severe disturbances]. *Metodicheskie voprosy issledovaniya na-dezhnosti bolshikh sistem energetiki. Mezhdunarodny seminar imeni Rudenko Yu.N.* [Methodical issues of researching the reliability of large-scale power systems. Intern. Scientific Seminar named after Yu.N. Rudenko]. Irkutsk, 2014. pp. 156–163.
4. Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V. Raschet i analiz dinamicheskoy ustoychivosti uzlov nagruzki promyshlennykh predpriyatiy s sobstvennymi elektrostantsiyami [Calculation and analysis of dynamic stability of load at the industrial enterprises with their own power plants]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2006, no. 4, pp. 94–98.
5. Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Bulanov O.V., Rotanova Yu.N. Raschet dinamicheskikh kharakteristik sinkhronnykh i asinkhronnykh dvigateley promyshlennykh predpriyatiy s tselyu analiza ustoychivosti sistem elektrosnabzheniya [Calculation of dynamic characteristics of synchronous and asynchronous motors at industrial enterprises to analyze the stability of power supply systems]. *Vestnik magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova*, 2006, no. 2, pp. 71–75.
6. Zaslavets B.I., Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Bulanov O.V., Rotanova Yu.N. Predstavlenie mashin peremennogo toka v raschetakh dinamicheskoy ustoychivosti sistem elektro-snabzheniya promyshlennykh predpriyatiy s sobstvennymi elektrostantsiyami [Presentation of AC machines in calculation of dynamic stability of power supply systems of industrial enterprises with their own power stations]. *Vestnik yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2008, no. 11 (111), pp. 3–8.
7. Kirpichenkova V.Ya. Vliyanie kanala regulirovaniya chastoty vrashcheniya vala asinkhronizirovannogo sinkhronnogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya chastoty na stokhastiches-

- kuyu ustoychivost mezh sistemnoy gibkoy svyazi [Effect of the channel for controlling the shaft speed of asynchronized synchronous electromechanical transducer on stochastic stability of intersystem flexible connection]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2007, no. 5, pp. 38–43.
8. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Sychev Yu.A., Plotnikov I.G. Dinamicheskaya ustoychivost elektromekhanicheskikh kompleksov s sinkhronnymi i asinkhronnymi dvigatelyami na predpriyatiyakh nefte dobychi [Dynamic stability of electromechanical complexes with synchronous and asynchronous motors at oil and gas enterprises]. *Electronic scientific journal «Oil and gas enterprises»*, 2011, no. 3, pp. 17–25.
 9. Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Ustinov D.A., Shklyarsky A.Ya. Aktivnaya kompensatsiya provalov i iskazheniy napravleny v sistemakh elektrosnabzheniya nefte dobyvayushchikh predpriyatiy [Active compensation of failures and voltage distortion in power supply systems of oil producing companies]. *Promyshlennaya energetika*, 2012, no. 4, pp. 23–25.
 10. Yandulsky A.S., Marchenko A.A., Nesterko A.B. Otsenka dinamicheskikh kharakteristik mnogomashinnykh elektroenergeticheskikh sistem na osnove dannykh sistemy monitoringa perekhodnykh rezhimov [Assessment of dynamic performance of multicomputer electric power systems on the basis of the monitoring system transients]. *Nauchnye trudy Vinnitskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 4, pp. 1–9.
 11. Belyaev A.N. Povyshenie dinamicheskoy ustoychivosti avtonomnykh energosistem nefte gazodobyvayushchikh kompleksov na osnove elektricheskogo tormozheniya [Increasing the dynamic stability of the autonomous power supply systems based on oil and gas complexes of electric braking]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 63, pp. 163–169.
 12. Aldo V. da Rosa. *Vozobnovlyemye istochniki energii. Fiziko-Tekhnicheskie osnovy* [Renewable energy sources. Physical and technical bases]. Moscow, Intellect Publ. House, MEI, 2010. 704 p.
 13. Udalov S.N. *Vozobnovlyemye istochniki energii* [Renewable energy sources]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. House, 2013. 458 p.
 14. Udalov S.N., Manusov V.Z. *Modelirovanie vetroenergeticheskikh ustanovok i upravlenie imi na osnove nechetkoy logiki* [Modeling of wind power plants and controlling them based on fuzzy logic]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. House, 2013. 200 p.
 15. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Rotanova Yu.N., Tarasov V.M. Analiz perekhodnykh rezhimov sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy, imeyushchikh v svoem sostave obekty maloy energetiki [Analysis of transient modes of power supply systems at industrial enterprises with small power]. *Promyshlennaya energetika*, 2010, no. 4, pp. 22–28.
 16. Gouda E. Comparative study between mechanical and magnetic planetary gears. *Magnetics, IEEE*, 2011, vol. 47, no. 2, pp. 439–450.
 17. Jian L. Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies. *Magnetics, IEEE*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4526–4529.
 18. Atallah K. A novel «Pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machine. *Magnetics, IEEE*, 2008, vol. 44, no. 11, pp. 4349–4352.
 19. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears. *Mechatronics, IEEE/ASME*, 2012, vol. 17, no. 2, pp. 269–278.
 20. Polinder H. Trends in Wind Turbine Generator Systems. *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*, 2013 September, vol. 1, no. 3, pp. 174–185.
 21. Neuland A.H. *Apparatus for transmitting power*. US Patent 1171351, Feb. 1916.
 22. Rasmussen P.O. Development of a high-performance magnetic gear. *Industry Applications, IEEE*, 2005, vol. 41, no. 3, pp. 764–770.
 23. Peng S., Fu W.N., Ho S.L. A Novel High Torque-Density Triple-Permanent-Magnet-Excited Magnetic Gear. *Magnetics, IEEE*, 2014, vol. 50, no. 11, pp. 1–4.
 24. Aho J.P., Kraft L.G. Control of a Wind Turbine with a Magnetic Continuously Variable Transmission for Mitigation of Torque Variations. *Proc. of the 2011 AIAA/ASME Wind Symposium*. USA, Orlando, 2011. pp. 1–28.
 25. Wang J., Atallah K., Carvley S.D. A magnetic continuously variable transmission device. *Magnetics, IEEE*, 2011, vol. 47, no. 10, pp. 2815–2818.

Received: 10 May 2015.