

УДК 621.3.077.2:621.3.077.3

ПОВЫШЕНИЕ ЗАПАСА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ РЕЗКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ РЕЖИМА НАГРУЗКИ

Удалов Сергей Николаевич¹,
oudalovsn@yandex.ru

Ачитаев Андрей Александрович¹,
ac-an-alec@mail.ru

Приступ Александр Георгиевич¹,
a_pristup@mail.ru

Боченков Борис Михайлович¹,
bochenkov@ngs.ru

¹ Новосибирский государственный технический университет,
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

Ветроэнергетика сегодня развивается в двух равноправных направлениях: увеличение единичной мощности ветроэнергетической установки за счёт массогабаритных размеров установки с использованием высоковольтных генераторов и второй путь – совершенствование отдельных элементов ветроэнергетических установок и внедрение современных систем управления режимами работы как установки в целом, так и её отдельными агрегатами. Оба пути развития направлены на увеличение выработки энергии. Характерной особенностью указанных источников электроэнергии является малая инерционность и, соответственно, малый запас динамической устойчивости при резких изменениях режима, например при коротких замыканиях. В последнее время стали широко использоваться исследования магнитных редукторов и вариаторов. Эти исследования связаны с высокими энергетическими показателями магнитных редукторов и трансмиссий, которые позволяют улучшить массогабаритные показатели и сократить потребность в обслуживании. Использование магнитных трансмиссий в ветроэнергетических установках оправдано возможностью регулирования скорости вращения генератора напрямую. Данная статья посвящена исследованию магнитной трансмиссии в целях сохранения синхронности параллельно работающих генераторов локальной энергосистемы при перегрузках. Регулирование скорости вращения ротора генератора осуществляется через магнитную трансмиссию и основано на использовании законов подчиненного регулирования по двум контурам. Результаты моделирования отображают процесс сохранения синхронной работы генераторов ветроэнергетической установки.

Цель работы: повышение запаса динамической устойчивости локальной энергосистемы, состоящей из параллельно работающих ветроэнергетических установок с синхронными генераторами с постоянными магнитами.

Методы исследования: разработка математических моделей магнитной трансмиссии с использованием классических преобразований Парка–Горева; использование законов подчиненного регулирования для стабилизации скорости вращения при различных возмущениях, как со стороны нагрузки, так и со стороны ветровой турбины.

Результаты. Получена математическая модель локальной энергетической системы, состоящей из параллельно работающих ветроэнергетических установок с синхронными генераторами с постоянными магнитами. Поддержание синхронной работы генераторов обеспечивается магнитной трансмиссией. Показана возможность стабилизации скорости вращения генераторов при перегрузке.

Ключевые слова:

Ветровая турбина, магнитная трансмиссия, динамическая устойчивость, локальная энергосистема.

Введение

В настоящее время ветроэнергетика является сложившимся направлением в возобновляемой энергетике, которое развивается быстрыми темпами. Ежегодно установленная мощность ветроэнергетических установок (ВЭУ) увеличивается в среднем на 25 %. По данным Всемирной ассоциации энергии ветра, установленная мощность всех мировых ветряных электростанций (ВЭС) в 2015 году впервые в истории оказалась выше общей мощности функционирующих атомных электростанций (АЭС): общая совокупная мощность мировых ВЭС превысила 400 ГВт, тогда как суммарная мощность действующих АЭС составляет 382,3 ГВт, включая остановленные энергоблоки АЭС в Японии (более 40 ГВт) [1, 2].

Ветроэнергетика в настоящий момент является одним из наиболее динамично развиваемых направлений альтернативной энергетики в мире. Электрический генератор и его трансмиссия являются сердцем ветроэнергетической системы. Существуют две базовые концепции построения ветровых турбин. Первая является классической редукторной системой на базе асинхронной машины двойного питания или синхронной машины с постоянными магнитами. Вторая – концепция прямого привода синхронной многополюсной машины с постоянными магнитами. К преимуществам редукторной концепции можно отнести сравнительную дешевизну. Но к недостаткам – значительные потери механической энергии в ге-

нераторе и в трансмиссии. Более того, практика эксплуатации механических редукторов показала высокую степень их износа при перегрузках и при ударных нагрузках от ветровой турбины [2]. Поэтому частый износ и повреждение механических редукторов сопряжено со значительными эксплуатационными расходами на обслуживание. Следует отметить, что наличие смазочных материалов внутри редуктора является одной из основных причин воспламенения гондолы ветроэнергетической установки [1]. К преимуществам концепции прямого привода можно отнести высокую энергетическую эффективность. Но, к сожалению, большие габариты и масса делают данную компоновку дорогой.

Особенностью малой генерации является использование синхронных машин с постоянными магнитами, где нет технических средств воздействия на выходное напряжение электрического генератора при переходных процессах в локальной энергетической системе, то есть отсутствует автоматическое регулирование возбуждения. В статье рассмотрен принцип стабилизации скорости вращения с использованием магнитной трансмиссии, которая представляет собой упругую связь между турбиной ветроэнергетической установки и синхронным генератором с постоянными магнитами. Вторая часть содержит постановку проблемы и современные способы её решения. Выделены недостатки существующих технических средств. Третья часть посвящена математическому моделированию динамики магнитного вариатора. Четвертая часть – результатам математического моделирования.

Постановка проблемы

В изолированной автономной электроэнергетической системе, состоящей из нескольких источников электрической энергии, однофазное замыкание в сетях до 1 кВ наблюдается в 70 % случаев от общего числа возмущений, которые являются аварийными. Дальнейшие действия защиты и автоматики 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 в энергосистеме 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 несинхронного режима оставшихся в работе генераторов [1].

На рис. 1 отражена структура системы, которая включает синхронные генераторы ветроэнергетических установок, работающих на электриче-

скую сеть. К узлам электрической сети подключены синхронные генераторы ветроэнергетической установки с постоянными магнитами. Упрощенная модель генератора представляет ЭДС E_k с фазой φ_k , подключенной к линии с активным сопротивлением R_k и реактивным сопротивлением $j\omega L_k$, где k – порядковый номер генератора. К узлу сети подключена комплексная нагрузка $P_{нс} + jQ_{нс}$ со ступенчатым изменением мощности [1, 2].

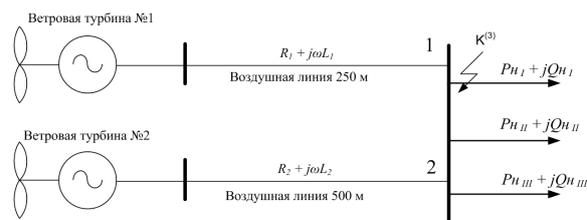


Рис. 1. Структурная схема исследуемой автономной энергосистемы

Fig. 1. Diagram of the investigated autonomous power system

На рис. 2 представлены осциллограммы переходных процессов напряжений двух параллельно работающих генераторов с разной мощностью (5 и 15 кВт). Из данных осциллограмм следует, что после возмущающего воздействия в обоих случаях наблюдаются асинхронные режимы синхронных генераторов с постоянными магнитами. В случае короткого замыкания наблюдается резкое изменение амплитуды напряжения с последующим отключением генератора из сети. Дело в том, что синхронные машины с постоянными магнитами не имеют собственных средств регулирования напряжения.

Использование кинетических накопителей не решает проблему в случае применения их внутри гондолы, при этом ухудшаются массогабаритные показатели, и, поскольку кинетический накопитель должен находиться в вакууме, его применение снижает надежность и требует значительных затрат на обслуживание [2–4].

В настоящий момент кардинальным решением данной проблемы является использование вставки постоянного тока, которая исключает проблему несинхронной работы генераторов. На рис. 3 отображена одна из разновидностей вставки постоянного тока. Однако следует отметить, что при коротком замыкании на присоединении нагрузки снижается напряжение ниже номинального в цепях управления вставки постоянного тока, что приводит к блокировке транзисторов IGBT и выводит генератор на режим невозможной отдачи активной мощности в сеть, вызывая его механическую перегрузку [5]. Одним из основных недостатков такого построения системы является высокая установленная мощность преобразовательной части регулирующего оборудования, поскольку идет двукратное преобразование энергии (выпрямление и инвертирование) с полной мощностью, отдаваемой генератором.

Известны исследовательские работы по обеспечению устойчивости параллельно работающих генераторов в локальной автономной энергетической системе, проводимые профессором А.Г. Фишовым [6, 7]. Его метод заключается в идентификации параметров и режимов работы и определении максимальной допустимой мощности нагрузки в целях сохранения устойчивой работы генераторов. Также известны исследования профессора В.М. Чебана по обеспечению устойчивости путем сообщения статору электрического генератора скорости вращения с целью синхронизации векторов ЭДС генератора и ЭДС энергетической системы [8, 9]. Безусловно, развитие локальных энергосистем играет важную роль, но, к сожалению, дополнительные подключения к локальной энергосистеме вызывают возмущения в работе генераторов. Предлагаемая статья направлена на исследование средства активного слежения за параметрами

устойчивости, и, в случае возмущающего воздействия, вызывающего асинхронный ход параллельно работающих генераторов, позволяет произвести восстановление синхронизма без потери питания.

Предлагаемое решение

Данная статья посвящена исследованию магнитных вариаторов на базе эффекта магнитной редукции частоты вращения. Суть эффекта магнитной редукции основана на модуляции магнитного поля, создаваемого быстроходным ротором с постоянными магнитами, ферромагнитными сегментами тихоходного ротора с генерацией гармоник, которые кратны количеству пар полюсов постоянных магнитов на внешнем статоре, что создаёт условия для трансформации момента. Фиксированное соотношение числа пар полюсов постоянных магнитов быстроходного ротора и числа ферромагнитных сегментов на тихоходном роторе

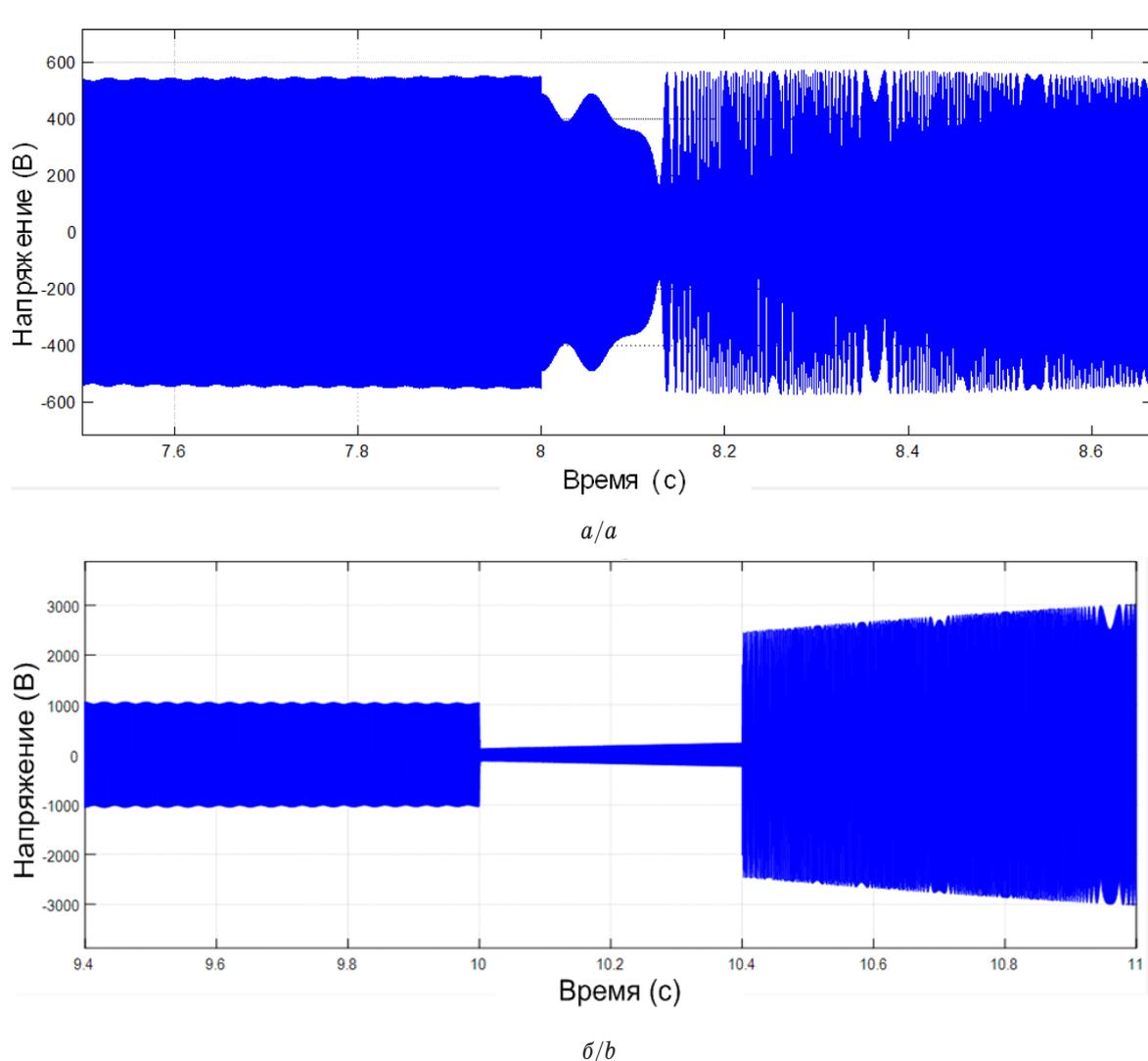


Рис. 2. Осциллограмма переходных процессов напряжения при различных возмущениях: а) резкое изменение нагрузки; б) короткое замыкание

Fig. 2. Oscillogram of voltage transients at various perturbations: a) sudden load changing; b) short circuit

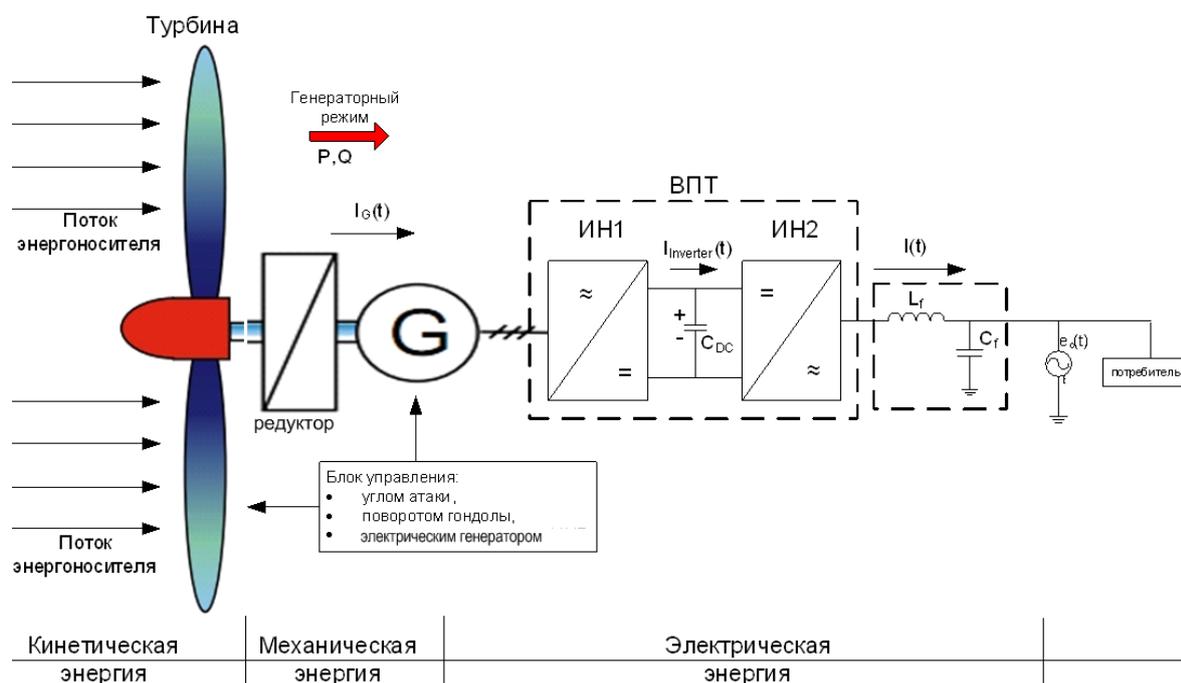


Рис. 3. Обобщенная структурная схема замещения классической редукторной ветроэнергетической установки

Fig. 3. Summarized block diagram of substitution of classic wind turbine gearbox

определяет передаточное отношение. Концепция магнитной редукции исключает проблемы механических повреждений, так как условия, при которых возникают повреждения внутри механического редуктора и последующий выход его из строя в магнитном редукторе исключены. Концепция магнитного редуктора обладает существенными преимуществами по сравнению с механическими редукторами: снижение массогабаритных показателей, увеличение КПД (до 98 %) за счет минимального трения, снижение нагрева и улучшение эксплуатационных показателей магнитного редуктора из-за отсутствия смазки [10].

Одним из способов снижения установленной мощности регулирующего оборудования является применение магнитной трансмиссии, которая включает в себя магнитный редуктор с ферромагнитными сегментами, необходимый для обеспечения фиксированного передаточного отношения, и интегрированный с редуктором дополнительный двигатель. При этом возможны два варианта построения трансмиссий. Один из вариантов предполагает формирование вращающего момента, который компенсирует возмущающий момент, при этом реализуется стабилизация скорости. Второй вариант обеспечивает формирование дополнительной скорости вращения генератора при неизменном вращающем моменте, и в результате суммирования скоростей изменяется передаточное отношение. Трансмиссия с таким построением играет роль магнитного вариатора. В предлагаемой статье анализируется первый вариант построения. При этом по сравнению с классической системой

(рис. 3) планетарный механический редуктор замещается на магнитную трансмиссию с традиционным векторным управлением. Магнитный редуктор является устройством для преобразования скорости турбины в синхронную скорость электрического генератора. На рис. 4 представлен эскиз магнитной трансмиссии, включающий в себя магнитный редуктор с фиксированным передаточным отношением и интегрированный с ней электродвигатель с постоянными магнитами, создающий до-

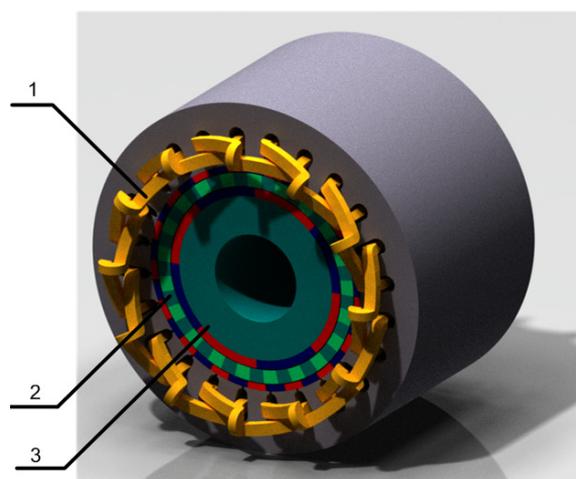


Рис. 4. Эскиз магнитного вариатора: 1 – обмотка управления; 2 – тихоходный ротор; 3 – быстроходный ротор

Fig. 4. Design of the magnetic continuously variable transmission: 1 is the control winding; 2 is the low-speed rotor; 3 is the high-speed rotor

полнительный момент на быстроходном роторе. Преобразование механического момента и скорости осуществляется через модулирующие ферромагнитные сегменты на тихоходном роторе трансмиссии, которые помещены между быстроходным ротором и ротором управления с разным числом пар полюсов [6]. Это исключает механический контакт между тихоходным и быстроходным валами и снижает механический износ и потери на трение. Физический принцип магнитной редукции был описан в работах [10–20].

Динамическая модель магнитного вариатора

Магнитная трансмиссия является устройством для преобразования момента между двумя вращающимися частями с различным числом постоянных магнитов через модулирующие ферромагнитные сегменты на тихоходном валу. Она позволяет стабилизировать скорость вращения тихоходного и быстроходного валов при возникновении возмущающего воздействия как со стороны нагрузки, так и со стороны турбины путем формирования дополнительного момента, компенсирующего возмущающий момент.

Следует обратить внимание, что в силовой схеме отсутствует какой-либо преобразователь и генератор подключен к локальной энергосистеме непосредственно (рис. 5). Для реализации управления применяются два инвертора, рассчитанные на значительно меньшую мощность, чем инвертор между генератором и энергосистемой в варианте прямого привода [16, 17]. Дополнительное питание звена управления возможно напрямую от энергосистемы. Инверторы напряжения обеспечивают преобразование частоты для заряда аккумуляторных батарей и питания обмотки управления трансмиссии. Применение буферного аккумулятора позволяет обеспечить устойчивость работы при снижении напряжения в системе в аварийных режимах.

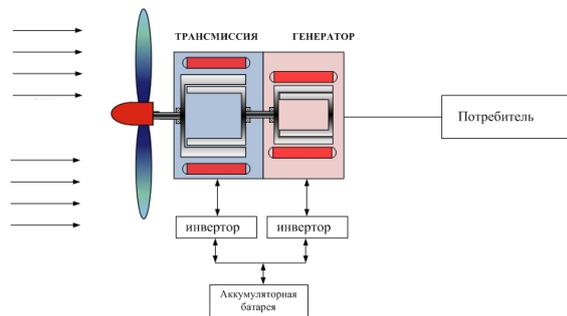


Рис. 5. Компоновка ветроэнергетической системы на базе магнитного вариатора и синхронного генератора

Fig. 5. Arrangement of a wind-driven system based on magnetic continuously variable transmission and synchronous generator

Уравнения, описывающие динамику магнитного вариатора, идентичны уравнениям синхронной

машины с постоянными магнитами. В осях d и q уравнения тока выглядят следующим образом [12, 13]:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \frac{\omega_e L_q i_q}{L_d} + \frac{u_d}{L_d}; \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \frac{\omega_e L_d i_d}{L_q} + \frac{u_q - K_e \omega_h}{L_q}, \end{cases} \quad (1)$$

где L_d и L_q – индуктивности двигателя звена управления в d и q осях; R – активное сопротивление на фазу; K_e – постоянная противоЭДС; u_d и u_q – напряжения в d и q осях; ω_h – скорость быстроходного вала; $\omega_s = p_h \cdot \omega_h$ – скорость электрического угла.

Момент, передаваемый от тихоходного звена к быстроходному, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} J_h \frac{d\omega_h}{dt} = M_{em} - M_{max}/G_r \cdot \sin(p_h \theta_h - n_s \theta_{Load}) + \\ \quad + M_{gen} - B_h \omega_h - \lambda_{ap} (p_h \theta_h - n_s \theta_{Load}); \\ J_0 \frac{d\omega_0}{dt} = M_{max} \sin(p_h \theta_h - n_s \theta_{Load}) - M_{Turbine} - \\ \quad - B_0 \omega_0 - \lambda_{ap} (p_h \omega_h - n_s \omega_{Load}), \end{cases} \quad (2)$$

где J_h , B_h – момент инерции и вязкое затухание ротора высокой скорости; ω_0 , J , B_0 – угловая скорость, суммарный момент инерции тихоходного вала, коэффициент вязкого трения; λ_{ap} – коэффициент затухания; n_s – число ферромагнитных модуляторов; p_h – число пар полюсов быстроходного ротора; $G_r = n_s/p_h$ – передаточное отношение магнитной трансмиссии; $M_{Turbine}$ – момент турбины ветроэнергетической установки.

На рис. 6 представлена структурная схема магнитного вариатора, которая представляет аналогию структуры магнитной муфты, описанного в исследованиях [17–20].

Уравнение электромагнитного момента будет определяться коэрцитивной силой постоянных магнитов ротора и током статора по оси q :

$$M_e = \frac{3}{2} p_h \varphi_m i_q, \quad (3)$$

где φ_m – поток рассеяния статора.

Уравнение магнитной жесткости K_{em} выражается через максимальный электромагнитный момент, передаваемый от тихоходного ротора к быстроходному, числа ферромагнитных стержней и угол нагрузки:

$$K_{em} = n_s M_{max} \cos(\theta_e). \quad (4)$$

Угол нагрузки θ_e магнитной трансмиссии определяется как угол расположения между быстроходным ротором и тихоходным:

$$\theta_e = p_h \theta_h - n_s \theta_0, \quad (5)$$

где θ_h и θ_0 – угловое положение быстроходного и тихоходного роторов соответственно.

Уравнение момента ветроэнергетической установки представлено в следующем виде [1, 2]:

$$M_{Turbine} = C_p(\beta, Z) \pi R_{blade}^2 \frac{\rho v^3}{2\omega_{load}}, \quad (6)$$

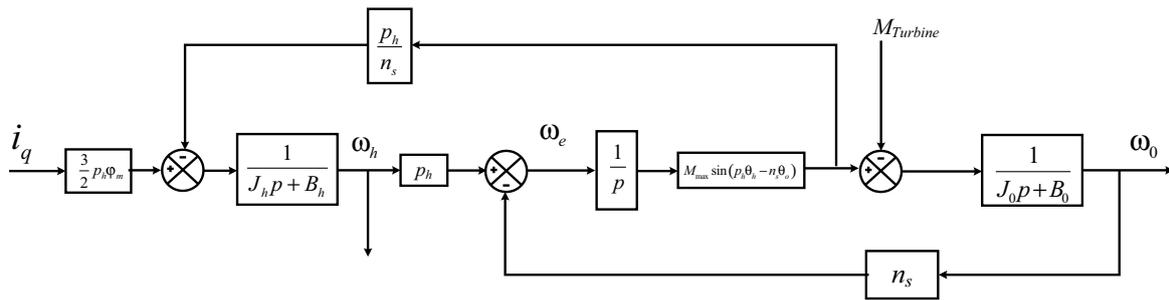


Рис. 6. Структурная блок-схема магнитного вариатора

Fig. 6. Structural block diagram of a magnetic continuously variable transmission

где v – скорость ветра, м/с; ω_{load} – скорость турбины, рад/с; ρ – плотность воздуха, равная $1,221 \text{ кг/м}^3$; d – диаметр ветровой турбины, м; R_{blade} – радиус лопасти, м; ω_{load} – скорость вращения турбины, рад/с, Z – быстроходность турбины.

Коэффициент мощности определяется по формуле

$$C_p(Z_{turbine}, \beta) = 0,73 \left(151 \frac{v}{Z_{turbine}} - 0,002 \beta - 13,2 \right) e^{-18,4 \cdot v / (Z_{turbine})}, \quad (7)$$

где $Z_{turbine} = \omega_{load} R_{blade} / v$ – быстроходность ветроэнергетической установки; β – угол заклинивания лопасти турбины, град.

Уравнение синхронного генератора с постоянными магнитами на базе уравнений Парка–Горевы [1]:

$$\begin{cases} U_d = \frac{d\Psi_d}{dt} + R_s I_d - \Psi_q \omega \\ U_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + R_s I_q - \Psi_d \omega, \\ \Psi_d = L_{d_gen} I_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_{q_gen} I_q \end{cases} \quad (8)$$

где U_d, U_q, I_d и I_q – напряжение и ток статора генератора по d и q осям; L_{d_gen}, L_{q_gen} – индуктивности статора; R_s – сопротивление обмотки статора; Ψ_d, Ψ_q – потокосцепление статора; Ψ_f – потокосцепление постоянных магнитов.

Электромагнитный момент электрической машины определяется следующим уравнением:

$$M_{gen} = \frac{3}{2} Z_p (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d). \quad (9)$$

На рис. 7 отображена интегральная модель двух ветроэнергетических установок, в которых не учтен контур управления углом заклинивания. Это было сделано в целях упрощения задачи. В дальнейших исследованиях будут рассмотрены комбинированные контуры согласований средств управления по постоянным временам регуляторов. Схема управления магнитным вариатором представляет собой схему двухконтурного управления. Внутренний контур тока – для стабилизации вращающего момента, внешний контур скорости –

для поддержания постоянной частоты вращения генератора. Два генератора подключены к локальной автономной энергетической системе, состоящей из ступенчатой нагрузки и линий электропередач с разной длиной. Система управления магнитным вариатором выполнена поле-ориентированной стратегией управления. В таблице представлены коэффициенты и параметры для пропорционально-интегрального регулятора тока и интегрального регулятора скорости, которые были синтезированы методом компенсации нулей и полюсов [16].

Таблица. Параметры синтеза для регуляторов тока и скорости
 Table. Synthesis parameters for current and speed controllers

Параметр/Parameter	Значение/Value	
$L_q=L_d$	40	мГн/mH
R	2	Ом/Ohm
J_h	4	кг·м ² /kg·m ²
J_0	2,5	
B_h	$1 \cdot 10^{-4}$	Нм·с/рад Nm·s/rad
B_0	$2 \cdot 10^{-4}$	
φ_m	0,6	Вб/Wb
$\omega_{H\ speed}$	314	рад/с/rad/s
ω_{speed}	30	
U_{dc}	440	В/V
i_q	9 А	А/A
λ_{cap}	$0,5 \cdot 10^{-4}$	Нм·с/па/Nm·s/rad
K_i	12	А/рад A/rad
K_s	1	Ом/Ohm
K_p	0,1	1/с/1/s
i_d	1	А/A
K_{em}	15	В·с/рад V·s/rad

На рис. 8 представлена осциллограмма стабилизации напряжения при резком изменении мощности в локальной автономной энергетической системе. Время восстановления напряжения составляет 10 с при резком увеличении мощности в энергосистеме на 40 %.

Дальнейшие исследования будут связаны с улучшением переходного процесса при всех возможных возмущениях в энергетической системе и со стороны ветроэнергетической турбины.

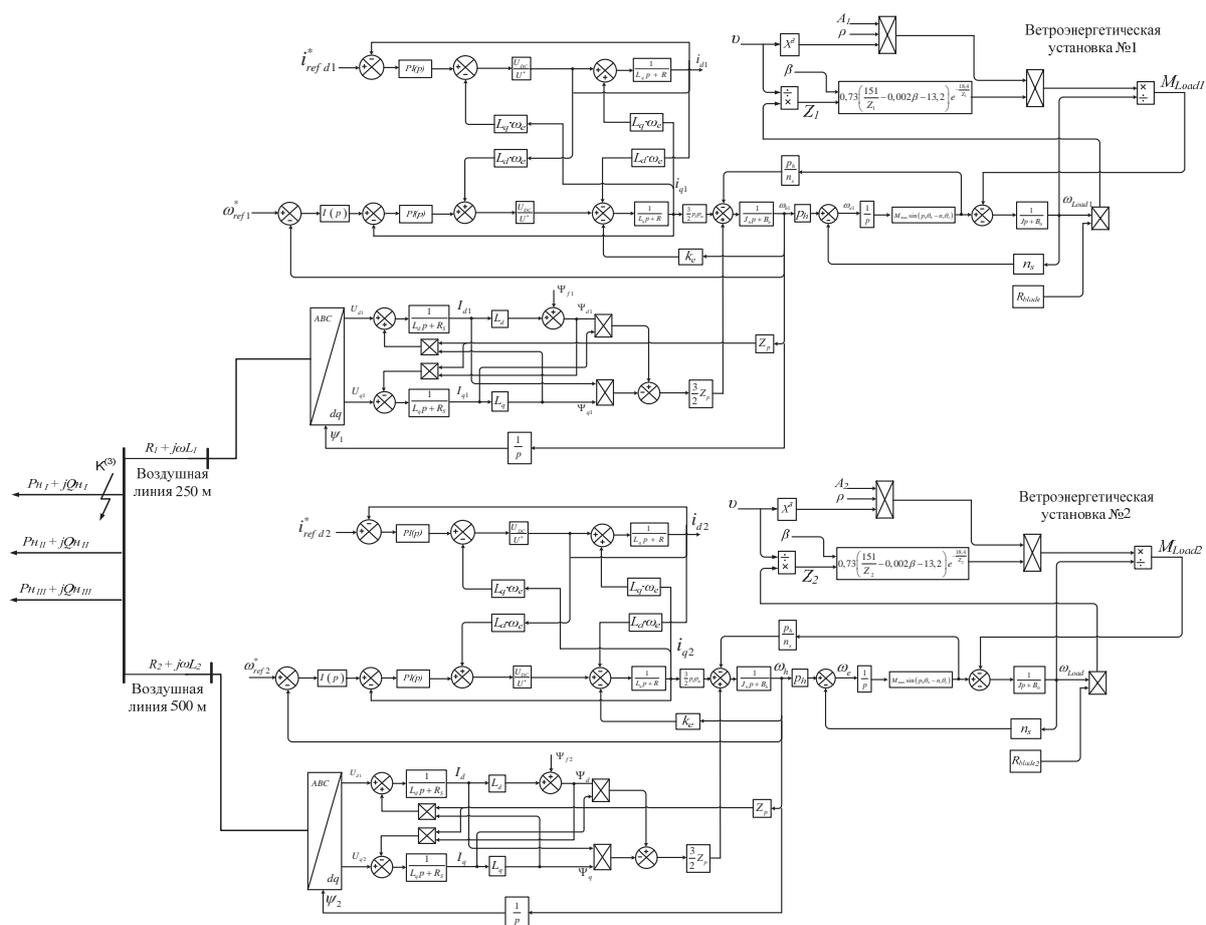


Рис. 7. Интегрированная модель ветроэнергетических установок с магнитным вариатором со схемой двухконтурного управления с подключением к локальной автономной энергетической системе

Fig. 7. Integrated model of wind turbines with a magnetic continuously variable transmission with a bypass control connection to local autonomous power system

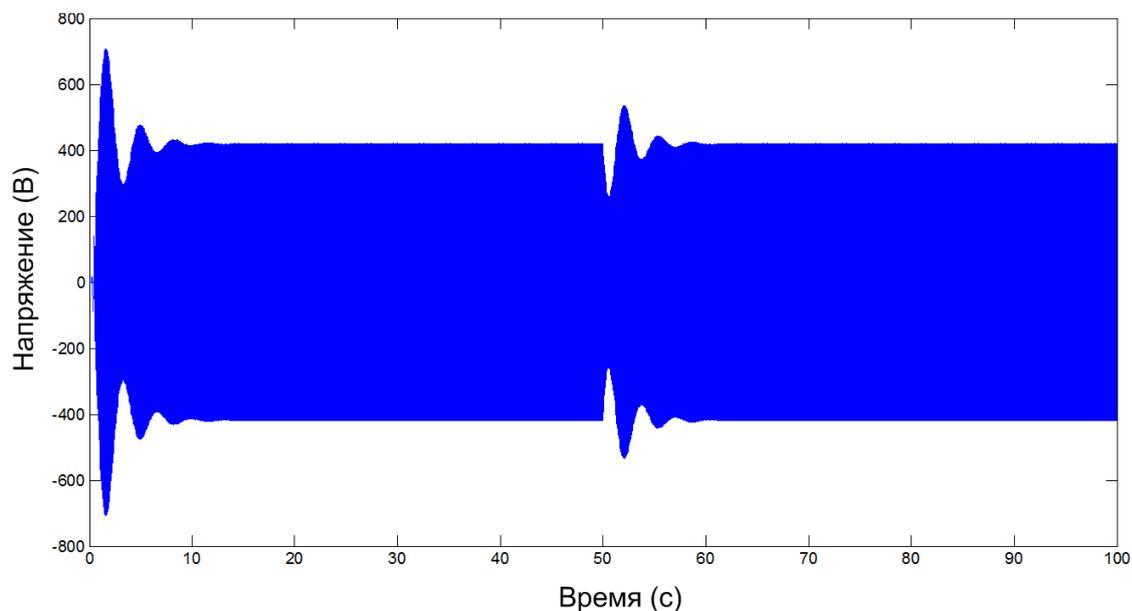


Рис. 8. Осциллограмма напряжения при поддержании синхронной скорости параллельно работающих генераторов

Fig. 8. Oscillogram of voltage while maintaining synchronous speed of parallel running generators

Заключение

В результате проведенных исследований была получена математическая модель системы электроснабжения, состоящая из двух электрических генераторов ветроэнергетических установок. Была предложена схема, состоящая из магнитных вариаторов и системы управления для стабилизации скорости вращения выходного ротора магнитного вариатора, присоединенного к генератору. Это позволило повысить динамическую устойчивость при переходных процессах в локальной энергетической системе.

Численные расчеты при резком изменении нагрузки на 40 % показали восстановление параллельной работы синхронных генераторов с постоянными магнитами через 10 с. Таким образом, исследован подход к сопряжению генератора ветроэнергетической установки и магнитного вариатора в составе с автономной энергетической системы без использования инвертора в силовой части цепи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00147 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удалов С.Н., Манусов В.З. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 200 с.
2. Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 458 с.
3. Альдо В. да Роза. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы. – М.: ИД «Интеллект», МЭИ, 2010. – 704 с.
4. Ragheb M., Tung M.T. Kinetic energy flywheel energy storage. – Champaign, IL, USA: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013. – 13 p.
5. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
6. Идентификация параметров схемы замещения и контроль устойчивости нагрузки в режиме on-line / А.Л. Нагайцев, А.В. Семенов, Р.В. Федюков, А.Г. Фишов, В.О. Чершова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. – 2015. – № 3. – С. 198–203.
7. Fishov A.G., Klavsuts D.A., Klavsuts I.L. Multi-agent regulation of voltage in smart grid system with the use of distributed generation and customers // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 761–767.
8. Cheban V.M., Tolkatsky R.A. Applying of the stator rotation to increase controllability of AC electrical machines // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 155–159.
9. Толкацкий Р. А., Чебан В. М. Использование вращения статора генераторов и двигателей переменного тока для регулирования их режимных параметров // Материалы Международной молодежной научно-технической конференции СЮ «управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах». – Новосибирск, 2011. – С. 23–28.
10. Rasmussen P.O. et al. Development of a high-performance magnetic gear // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – V. 41. – № 3. – P. 764–770.
11. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2012. – V. 17. – № 2. – P. 269–278.
12. Bouheraoua M., Wang J., Atallah K. Speed Control for a Pseudo Direct Drive Permanent-Magnet Machine with One Position Sensor on Low-Speed Rotor // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – V. 50. – № 6. – P. 3825–3833.
13. Wang J., Atallah K. Modeling and control of «pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machines // Proc. IEEE IEMDC. – Miami, 2009. – P. 870–875.
14. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears // IEEE. ASME Trans. Mechatronics. – April 2012. – V. 17. – № 2. – P. 269–278.
15. 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.
16. Удалов С.Н., Приступ А.Г., Ачитаев А.А. Исследование магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением в ветроэнергетической установке в целях повышения запаса динамической устойчивости // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 123–132.
17. Atallah K., Calverley S.D., Howe D. High-performance magnetic gears // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2004. – V. 272. – P. E1727–E1729.
18. Atallah K. et al. A novel «pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machine // IEEE Transactions on Magnetics. – 2008. – V. 44. – № 11. – P. 4349–4352.
19. Aho J.P., Kraft L.G. Control of a Wind Turbine with a Magnetic Continuously Variable Transmission for Mitigation of Torque Variations // 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4–7 January 2011, Orlando, Florida – P. 1–28.
20. Atallah K., Wang J. A brushless permanent magnet machine with integrated differential // IEEE Transactions on Magnetics. – 2011. – V. 47. – № 10. – P. 4246–4249.

Поступила 15.08.2016.

Информация об авторах

Удалов С.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.

Ачитаев А.А., аспирант кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.

Приступ А.Г., кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики Новосибирского государственного технического университета.

Боченков Б.М., кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского государственного технического университета.

UDC 621.3.077.2:621.3.077.3

INCREASE OF DYNAMIC STABILITY STOCK OF AUTONOMOUS ENERGY SYSTEM BASED ON WIND ENERGY INSTALLATIONS UNDER SUDDEN LOAD CHANGE

Sergey N. Udalov¹,
oudalovsn@yandex.ru

Andrey A. Achitaev¹,
ac-an-alec@mail.ru

Alexander G. Pristup¹,
a_pristup@mail.ru

Boris M. Bochenkov¹,
bochenkov@ngs.ru

¹ Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

Nowadays, wind power engineering is developing in two equal directions. The first one is the increase of rated power for a single wind turbine by mass and dimensions parameters of a wind turbine with the use of high-voltage generators. The second direction is modernization of wind turbine elements and implementation of modern control systems for a whole wind turbine and for its elements to enhance power generation. These power sources are characterized by low inertia and small margin of dynamic stability under sharp power variations, for example, under short circuits. In recent years magnetic gears and variators investigations are widely used. These investigations are associated with high energy performance of magnetic gears and variators which can reduce the weight and size parameters and reduce the need for maintenance. Using magnetic variable-speed drives in wind turbines generator justified the possibility of regulating directly generator rotation speed. The paper is devoted to the use of magnetic continuously variable transmission to synchronize generators in power system under transient processes. A generator rotor rotational speed is regulated through magnetic variator laws and it is based on use of two subordinate regulation circuits.

The main aim of the study is to increase dynamic stability stock of the local power supply system consisting of wind power generators operating in parallel.

The methods: development of mathematical models of magnetic transmission using classical Park–Gorev transformations; using the laws of slave control when negotiating rotation speed in case of overload.

The results. The authors have developed the mathematical model of local energy system consisting of parallel operating wind turbines with synchronous generators with permanent magnets. Synchronous operation of generators is supported by use of magnetic continuously variable transmission. The paper demonstrated the possibility to stabilize the generator rotation speed at overload.

Key words:

Wind turbine, magnetic continuously variable transmission, dynamic stability, autonomous power system.

The study was supported by RFBR, research project No. 16–38–00147 mol_a.

REFERENCES

1. Udalov S.N., Manusov V.Z. *Modelirovanie vetroenergeticheskikh ustanovok i upravlenie imi na osnove nechetkoy logiki* [Modeling wind power plants and control based on fuzzy logic]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. house, 2013. 200 p.
2. Udalov S.N. *Vozobnovlyаемые источники энергии* [Renewable energy sources]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. house, 2013. 458 p.
3. Aldo V. da Rosa. *Vozobnovlyаемые источники энергии. Физико-технические основы* [Renewable energy sources. Physical and technical bases]. Moscow, Intellect Publ. house, MEI, 2010. 704 p.
4. Ragheb M., Tung M.T. *Kinetic energy flywheel energy storage*. Champaign, IL, USA, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013. 13 p.
5. Zinovev G.S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of power electronics]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. house, 2003. 664 p.
6. Nagaytsev A.L. Semenov A.V., Fedukov R.V., Fishov A.G., Chershova V.O. Real Time Identification of the Load Equivalent Circuit Parameters and Stability of Load Control. *Nauchnye problemy transporta sibli i Dalnego vostoka*, 2015, no. 3, pp. 198–203. In Rus.
7. Fishov A.G., Klavtsuts D.A., Klavtsuts I.L. Multi-agent regulation of voltage in smart grid system with the use of distributed generation and customers. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014, pp. 761–767.
8. Cheban V.M., Tolkatsky R.A. Applying of the stator rotation to increase controllability of AC electrical machines. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014, pp. 155–159.
9. Tolkatsky R.A., Cheban V.M. Using the stator rotation generators and AC motors to regulate their mode parameters. *International Youth Scientific and Technical Conference of the CIO. Management, information and optimization in power systems*. Novosibirsk, 2011. pp 23–28. In Rus.
10. Rasmussen P.O. Development of a high-performance magnetic gear. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, vol. 41, no. 3, pp. 764–770.
11. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, vol. 17, no. 2, pp. 269–278.

12. Bouheraoua M., Wang J., Atallah K. Speed Control for a Pseudo Direct Drive Permanent-Magnet Machine With One Position Sensor on Low-Speed Rotor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 3825–3833.
13. Wang J., Atallah K. Modeling and control of «pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machines. *Proc. IEEE IEMDC*. Miami, 2009, pp. 870–875.
14. Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears. *IEEE. ASME Trans. Mechatronics*, April 2012, vol. 17, no. 2, pp. 269–278.
15. 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.
16. Udalov S.N. Research of magnetic transmission with variable gear ratio in a wind-driven generator for improving dynamic stability stroke. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 123–132. In Rus.
17. Atallah K., Calverley S.D., Howe D. High-performance magnetic gears. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, vol. 272, pp. E1727–E1729.
18. Atallah K. A novel «pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machine. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, vol. 44, no. 11, pp. 4349–4352.
19. Aho J.P., Kraft L.G. Control of a Wind Turbine with a Magnetic Continuously Variable Transmission for Mitigation of Torque Variations. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4–7 January 2011, Orlando, Florida. pp. 1–28.
20. Atallah K., Wang J. A brushless permanent magnet machine with integrated differential. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, vol. 47, no. 10, pp. 4246–4249.

Received: 15 August 2016.

Information about the authors

Sergey N. Udalov, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State Technical University.

Andrey A. Achitav, postgraduate student, Novosibirsk State Technical University.

Alexander G. Pristup, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State Technical University.

Boris M. Bochenkov, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State Technical University.