

Раздел II. Энергетика, механика

УДК 681.513

А.А. Мазалов

АДАПТИВНАЯ ВЕТРОУСТАНОВКА С МАШИНОЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Рассматривается адаптивная система управления ветроэнергетической установки, обеспечивающая решение задачи стабилизации напряжения и частоты на выходе генератора. Целью исследования является разработка структуры и методов синтеза адаптивной системы управления, что позволит решить проблему генерации переменного напряжения со стабильными параметрами при изменении в широких пределах скорости ветра и подключаемой нагрузки. Это достигается за счёт использования новой структуры ветроэнергетической системы, в которой электрический преобразователь помещается в роторную цепь генератора, и адаптивного изменения частоты и амплитуды напряжения, подаваемого в фазный ротор. Такая структура позволяет уменьшить стоимость установки за счёт существенного снижения мощности преобразователя. Разработана компьютерная модель для исследования системы управления, приведены результаты моделирования.

Ветроэнергетическая установка; адаптивная система управления; машина переменного тока двойного питания.

A.A. Mazalov

ADAPTIVE WIND POWER PLANT WITH ALTERNATING CURRENT DOUBLE FED INDUCTION MACHINE

At this article adaptive control system of wind power plant is considered. The research objects are both methods of synthesis as well as a structure of adaptive control system. It is necessary to ensure stable parameters of alternating voltage generation in a wide range of wind speed and the load connected. The output voltage parameter stability is achieved by using the new control system structure. In this structure electrical converter is placed in the rotor circuit and adaptive changes in frequency and amplitude of the rotor voltage. This structure reduces installation cost due to the possibility of using commercially available machines of alternating current and reduces the converter's power. In addition a computer model to study control-executive system was developed.

Wind power plant; adaptive control system; wound-rotor doubly-fed electric machine.

Введение. Постоянно растущие потребности человечества в энергии сегодня удовлетворяются, в основном, за счёт переработки традиционного топлива. Количество этого топлива ограничено, и как следствие мир столкнётся с серьёзными энергетическими проблемами. Возрастающая потребность в энергоносителях при нестабильных ценах на нефть вынуждает искать альтернативные решения энергетических проблем. Одним из наиболее успешно развиваемых видов альтернативной энергетики является ветроэнергетика.

Быстрый рост установленных ветроэнергетических мощностей за последние годы оказался возможен за счёт разработки и внедрения новых технологических решений, одним из которых является применение в качестве генератора ветроэнергетической установки (ВЭУ) асинхронной машины двойного питания (АМДП). Это позволяет создавать мощные сетевые ВЭУ с переменной частотой

вращения лопастей, не уступающих по своей эффективности ВЭУ с фиксированной частотой вращения. При этом снижается мощность преобразующих устройств до 30 % от мощности всей установки, что ведёт к уменьшению потерь в этих устройствах и снижению их стоимости.

Известно, что параметры генерируемого напряжения зависят от скорости набегающего воздушного потока. Вместе с тем необходимость выработки качественного стабильного напряжения ставит задачу разработки технологических решений, позволяющих минимизировать влияние изменяющегося воздушного потока на качество получаемой энергии. Таким технологическим решением является адаптивная система управления (СУ) ВЭУ с АМДП, позволяющая с высокой скоростью реагировать на изменение скорости ветра и величину подключаемой электрической нагрузки, тем самым поддерживая стабильность выходного напряжения генератора. Большая потребность в автономных недорогих ВЭС всех мощностей делает их разработку востребованной. Синтезируя адаптивный быстродействующий регулятор напряжения, и используя структуру ВЭУ на базе АМДП, становится возможным проектирование и строительство таких типов ВЭУ.

Структура адаптивной ВЭУ

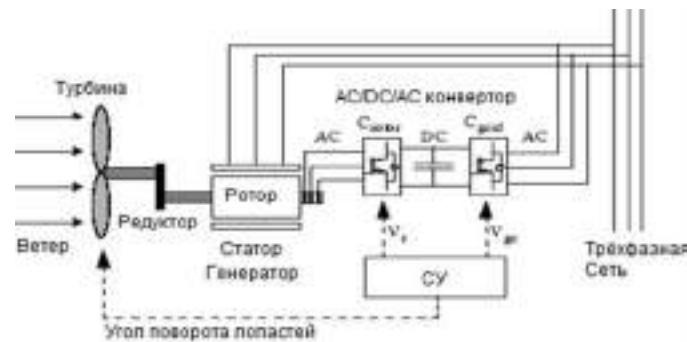


Рис. 1. Переменно-скоростная ветроэнергетическая система с АМДП

Структура переменно-скоростной сетевой ветроэнергетической системы на базе АМДП приведена на рис. 1. Здесь статор генератора подключается напрямую к сети, в то время как ротор через скользящие кольца подключается к АС/DC/АС преобразователю. Преобразователь выбирается способным функционировать в рабочем диапазоне токов ротора с небольшим запасом мощности, а также с каналом управления по частоте и амплитуде. Рабочий диапазон частот вращения ротора индивидуален для каждой системы, и в среднем, согласно [7], лежит в диапазоне от 70 до 130 % от синхронной частоты. Основное назначение DC/АС преобразователя – преобразование постоянного напряжения с выхода резервного источника, либо управляемого выпрямителя в переменное таких параметров, при которых подача его на фазный ротор генератора позволит получить на его выходе переменное напряжение заданных параметров. Контролем необходимых параметров и управлением ветроустановки занимается система управления. В частности, она служит для поддержания стабильности генерируемого напряжения за счёт управления напряжением в роторной цепи, контроля угла поворота лопастей ветроколеса установки, контроля как потребления, так и отдачи реактивной мощности в сеть, а также синхронизации ВЭУ с сетью.

Таким образом, проектируемая система управления позволит расширить область применения переменно-скоростных ВЭУ с АМДП и улучшить их характеристики. Актуальной становится задача разработки новых адаптивных регуляторов, позволяющих улучшить качество выходного напряжения уже построенных сетевых

ВЭС с АДП, а также делающих возможным создание автономных ВЭУ с использованием такой же структуры. При этом синтез таких адаптивных алгоритмов управления ведётся с учётом физических принципов и законов, описываемых математической моделью АДП, а также того факта, что такая модель является адекватной лишь с учётом определённых допущений, указываемых при её создании.

Алгоритмы адаптивной системы управления. Система управления позволяет придать адаптивные свойства ВЭУ, обеспечивая стабилизацию частоты и амплитуды выходного напряжения генератора при изменении скорости ветра и тока нагрузки. ВЭУ представляет собой нелинейную многосвязную систему, поэтому для синтеза ее системы управления в общем случае требуется применять адаптивные методы [2–4]. В данном случае осуществляется стабилизация ВЭУ в заданном режиме, что позволяет использовать адаптивные ПИ-регуляторы.

Стабилизация частоты выходного напряжения АДП. Согласно [1], закон управления по частоте, при известных механической частоте вращения вала генератора и числе пар полюсов машины, имеет вид

$$f_{\text{напр.рот.}} = f_{\text{напр.стат.}} - f_{\text{рот.мех.}} \cdot p. \quad (1)$$

Таким образом, можно поддерживать постоянной частоту генерируемого напряжения. Из (1) следует, что это не сопряжено со значительными сложностями, что упрощает СУ в целом и снижает требования к вычислительной мощности микроконтроллера, на которой она будет построена.

Стабилизация амплитуды. Предлагаемый метод стабилизации амплитуды выходного напряжения АДП основан на том факте, что при изменении амплитуды переменного напряжения, поданного на фазный ротор, амплитуда выходного напряжения АДП также изменяется.

Поддержание постоянным амплитудного значения выходного напряжения генератора связано с некоторыми сложностями, так как его колебания связаны не только с частотой вращения ротора и величиной подключённой электрической нагрузки, но также и с внутренними параметрами самого генератора, такими как число пар полюсов, величинами сопротивлений и индуктивностями обмоток. Кроме того, в реальных условиях существует явление насыщения стали магнитопровода машины, и изменения активного и индуктивного сопротивлений в зависимости от температуры обмоток и частоты токов, протекающих через них, соответственно. В данной работе исследования ведутся без учёта насыщения стали магнитопровода машины и влияния температуры обмоток на проводимость материала.

Отметим, что для эффективного решения задачи стабилизации амплитуды, необходимо ответить на два важных вопроса – напряжение какой величины должно быть подано на фазный ротор при текущих условиях, а также каким именно способом лучше всего это сделать.

Из [5] известно, что для электротехнических расчётов АДП можно представить в виде эквивалентной схемы замещения. Для того, чтобы рассчитать амплитуду напряжения, которое необходимо подать на ротор, воспользуемся Т-образной схемой замещения АДП, подробно описанной в [6]. Произведя необходимые расчёты, получим

$$U_R = \frac{U_s \cdot S \cdot (R_L + Z_E)}{R_L}, \quad (2)$$

$$Z_E = Z_R + \frac{Z_m \cdot Z_S}{Z_m + Z_S},$$

где – сопротивление части схемы замещения;

Z_R, Z_S, Z_m, Z_L – соответственно приведённые сопротивления ротора, статора, магнитное сопротивление и нагрузки; S – скольжение; U_s, U_R – напряжения статора и ротора.

Таким образом, используя схему замещения с приведёнными к статору параметрами обмоток, можно рассчитать необходимое напряжение ротора, при известных внутренних параметрах генератора и заданном желаемом значении напряжения статора U_s . Отметим, что в реальных условиях, из-за описанных выше ограничений, генератор, при подаче на него напряжения, рассчитанного по формуле (2), выдаст напряжение, отличающееся от U_s в среднем на $\pm 10\%$ в зависимости от конкретных условий работы. Кроме того, при подаче на ротор сразу всей величины рассчитанного напряжения, будет вызван сильный переходной процесс, который негативно скажется на качестве генерируемого в этот момент напряжения. Исходя из этого, можно сделать вывод, что расчёт по формуле (2) может быть использован СУ в качестве ориентировочной оценки величины напряжения ротора, или, если это оправдано, грубого управления. Однако для качественного точного регулирования необходимо синтезировать адаптивный регулятор на основе такой оценки.

Синтез адаптивного регулятора. В качестве точного быстродействующего регулятора предлагается использовать адаптивный ПИ-регулятор с переменным коэффициентом интегральной составляющей. Его реализация представлена в виде следующих выражений:

$$U_R = k_p (U_s - U_{s.now}) + k_I \int (U_s - U_{s.now}) dt, \quad (3)$$

$$k_I = F(f_{shaft}, R_L, IPG). \quad (4)$$

Коэффициент k_p является константой и его величина определяется путем настройки каким-либо стандартным методом. Коэффициент k_I , согласно формуле (4), изменяется в зависимости от внутренних параметров генератора и текущих возмущений, которыми являются частота вращения вала и величина подключённой нагрузки, т.е. проявляет адаптивность к изменяющимся условиям работы системы. k_I вычисляется с использованием зависимости (2), и может быть представлен в виде

$$k_I = \frac{U_R}{A} = \frac{U_s \cdot S \cdot (R_L + Z_E)}{A \cdot R_L}. \quad (5)$$

Здесь A – эмпирический коэффициент, подбираемый для конкретной модели генератора.

В результате исследования обнаружено, что общепринятые способы настройки коэффициентов усиления пропорциональной и интегральной составляющих регулятора, применительно к синтезируемой СУ, оказываются малоэффективными. Подбрав их для определённой скорости ветра и нагрузки, оказалось, что при других значениях этих величин регулятор начинал работать неудовлетворительно. Главным образом, на стабильность и скорость регулирования влияет интегральная составляющая регулятора, и для того, чтобы определить её значение, была использована зависимость (2). Поэтому, прежде чем начать регулирование амплитуды напряжения возбуждения при текущей скорости ветра и нагрузке, СУ приблизительно оценивает её, и исходя из этой величины определяется интегральная составляющая. После этого регулятор начинает свою работу. Вычисления ведутся до тех пор, пока невязка, или рассогласование $U_s - U_{s.now}$ не станет равна нулю.

Таким образом, основываясь на выражениях (2) и (5), система управления рассчитывает требуемые параметры напряжения возбуждения, передаёт их в инвертор, который физически создаёт и подаёт его на ротор. Независимо от того, какая нагрузка подключена и с какой скоростью будет вращаться вал генератора, на его выходе будет трёхфазное напряжение с постоянными частотой, амплитудой и фазой, т.е. вся система является адаптивной, что подтверждается результатами моделирования. Также следует учесть нелинейности системы, ограничив токи, протекающие в обмотках статора и ротора АДП.

Однако, на синхронной частоте выражения (2) и (5) обращаются в ноль, что означает, что при этих условиях напряжение на ротор не должно подаваться. Данный вывод не согласуется с общепринятыми теоретическими положениями, что заставляет выделить работу АДП на синхронной скорости в отдельный режим работы, и исследовать его в дальнейшем.

Эмпирический коэффициент A в выражении (5), подбираемый для конкретной модели генератора, снижает адаптивные свойства системы, так как рассчитывается вручную. Величина его зависит, главным образом, от напряжения, которое необходимо подать на ротор, и максимально допустимого времени адаптации, то есть можно записать, что $A = F(U_R, t_{ad.max})$.

Отметим, что повысить адаптивные свойства системы управления можно с помощью современных методов управления, например [8, 9].

Компьютерная модель адаптивной СУ. Общая схема модели подробно описана в работе [1]. Схематическое изображение системы управления приведено на рис. 2. Используя на своём входе данные о текущей частоте вращения вала, силе тока и напряжения в статорной цепи, а также известные постоянные величины, такие как значения внутренних параметров генератора и параметров генерируемого напряжения, СУ выдаёт на выходе необходимые значения амплитуды и частоты напряжения ротора. Для наглядности и контроля результатов снимаются осциллограммы трехфазных напряжений на роторе генератора и его выходе, а также ведётся измерение потребляемой активной и реактивной мощности в статорной и роторной цепях.

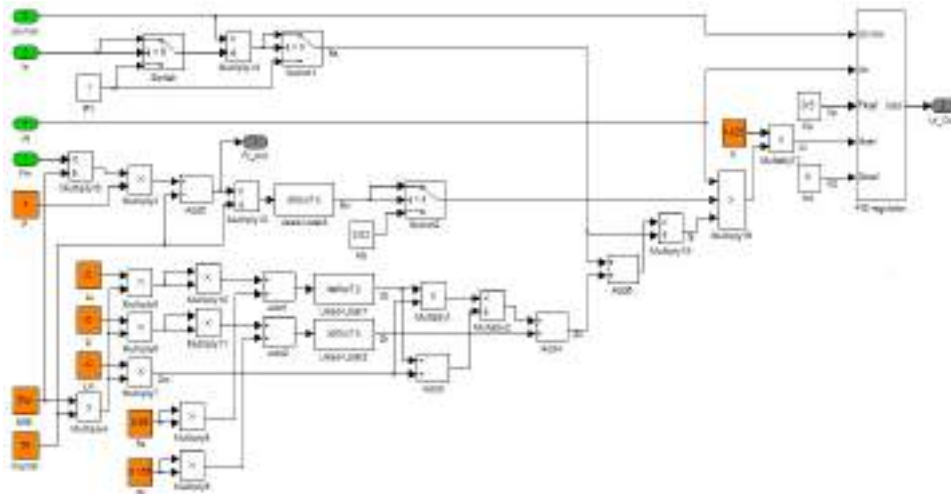


Рис. 2. Модель СУ ВЭУ с АДП

Описание экспериментов. Для предварительного анализа и исследования адаптивной ВЭУ были поставлены следующие эксперименты:

1. Исследование адаптивных свойств СУ. Цель эксперимента – подтвердить работоспособность адаптивной СУ, оценить качество управления. В работе [1] дано подробное описание эксперимента и его результатов.

2. Исследование потребления и отдачи реактивной мощности в сеть. Цель эксперимента – подтвердить способность АДП при определённых условиях быть как потребителем реактивной мощности, так и её источником. Известно, что рабочим диапазоном частоты вращения АДП является диапазон в среднем от 70 до 130 % от синхронной частоты. При неизменной нагрузке будем увеличивать частоту вращения вала генератора от нижнего предела рабочего диапазона до верхнего. Согласно [7], при этом АДП на подсинхронной частоте будет являться потребителем реактивной мощности, а на сверхсинхронной – её источником.

Результаты моделирования. На рис. 3 и 4 представлены результаты проведения экспериментов.

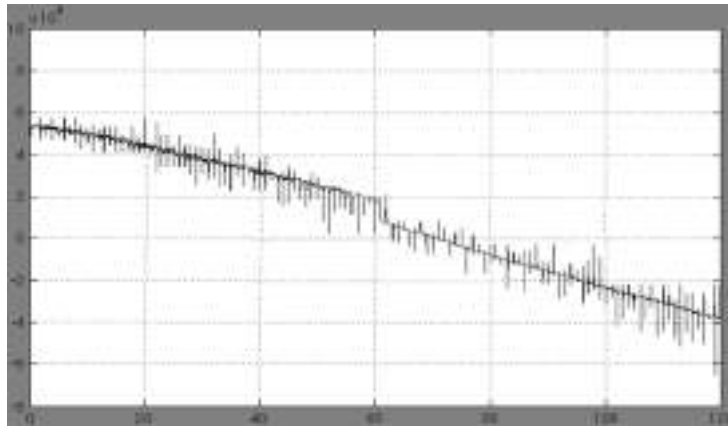


Рис. 3. Диаграмма потребления и отдачи реактивной мощности

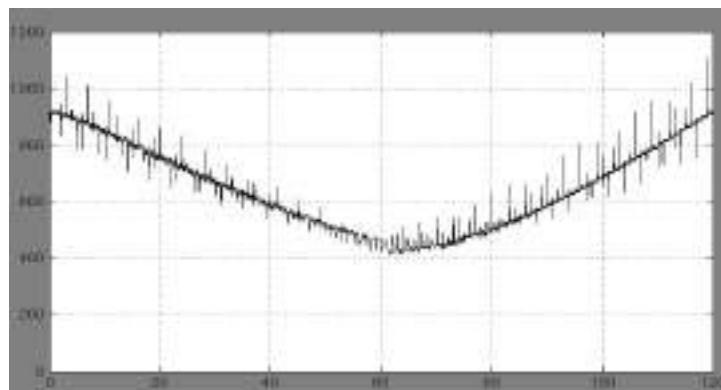


Рис. 4. Амплитуда фазного напряжения фазы А ротора

Так, согласно [1], эксперимент 1 показал, что разработанная СУ обладает адаптивными свойствами, обеспечивает качественное управление при высоком быстродействии. Эксперимент 2 показал, что ветроэнергетическая система на базе АДП способна быть как источником, так и потребителем реактивной мощности.

Это подтверждается диаграммой потребления реактивной мощности, приведённой на рис. 3. Как и ожидалось, АМДП потребляет реактивную мощность на подсинхронной частоте (моменты времени с 0 по 60), покрывает потребление собственной реактивной мощности (моменты времени с 60 по 95), и отдаёт её на сверхсинхронной (моменты времени с 95 по 120). При этом, на рис. 4, приводится диаграмма напряжения ротора, подтверждающая наличие его минимальной величины на синхронной частоте и её рост на под- и сверхсинхронных частотах вращения. При неизменной подключённой нагрузке сила тока также будет иметь U-образный вид. Это означает, что чем больше отклонение частоты вращения вала генератора от синхронной, тем большая сила тока протекает в цепи ротора. Максимально возможное значение силы тока в роторной цепи конкретной модели генератора и будет определять границы допустимого диапазона частоты вращения вала для конкретной мощности подключённой нагрузки. Как следствие, уменьшение её мощности позволит существенно расширить рабочий диапазон исследуемой ВЭУ, что означает возможность осуществления процесса преобразования энергии в широком диапазоне скоростей ветра, при условии изменения мощности, требуемой от ВЭУ, в зависимости от скорости ветра.

Заключение. В данной работе был описан процесс синтеза и последующего исследования адаптивной СУ ВЭУ с АМДП, позволяющей решить поставленные задачи исследования и реализовать все преимущества ветроэнергетических систем, использующих подобную структуру. В частности, были получены следующие результаты:

1. Разработаны алгоритмы функционирования СУ, синтезированные на основе схемы замещения АМДП и адаптивного ПИ-регулятора с переменным коэффициентом интегральной составляющей. Это позволило поддерживать постоянными во времени основные параметры генерируемого переменного напряжения, такие как амплитуда и частота, при вариациях вращения вала генератора и величины подключаемой нагрузки.
2. Разработана компьютерная модель ВЭУ с АМДП, включающая в себя адаптивную систему управления. Это позволило реализовать и исследовать синтезированные алгоритмы работы такой СУ, оценить её качество функционирования, выявить достоинства и недостатки, а также наметить дальнейшие цели исследования в этой области.
3. Также были подтверждены некоторые общеизвестные свойства АМДП, такие как способность отдавать и потреблять реактивную мощность, U-образный вид кривой напряжения ротора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мазалов А.А. Адаптивная ветроустановка переменного тока с асинхронным генератором // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 250-256.
2. Шанин Д.А., Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю. Построение нейросетевых регуляторов для синтеза адаптивных систем управления // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2008. – № 3. – Т. 6. – С. 48-52.
3. Медведев М.Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 6. – С. 17-22.
4. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю., Борзов В.И. Автономные управляемые ветроэнергетические установки // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 202-207.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – С. 840.
6. Каляева А.А., Мазур А.Я. Электрические машины. – Минск: Высшая школа, 1971. – С. 367.
7. Petersson A. Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines, Thesis for the degree of licentiate of engineering, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2003. – P. 122.

8. *Психопов В.Х., Медведев М.Ю.* Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 187-196.
9. *Медведев М.Ю.* Структура и алгоритмическое обеспечение нелинейного наблюдателя производных в условиях действия случайных шумов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 20-25.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

Мазалов Андрей Андреевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: Anmaz8@list.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; ассистент.

Mazalov Andrey Andrejevich – Taganrog Institute of Technological – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: Anmaz8@list.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: 88634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; assistant.

УДК 629.113

М.А. Береснев

ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА ОПЕРЕЖЕНИЯ ЗАЖИГАНИЯ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ БИНАРНОГО ТОПЛИВА

Рассмотрена задача повышения крутящего момента двигателя внутреннего сгорания без сопутствующего увеличения расхода топлива. Предлагается использование бинарного топлива, состоящего из смеси бензина и сжиженного газа, которое за счет высокой детонационной стойкости позволяет реализовать угол опережения зажигания, обеспечивающий максимум давления в цилиндре в целевом диапазоне поворота коленчатого вала. Делается вывод, что помимо увеличения крутящего момента и мощности двигателя, бинарное топливо позволит снизить расходы на топливо и выбросы вредных продуктов сгорания в атмосферу.

Двигатель внутреннего сгорания; угол опережения зажигания; бинарное топливо; крутящий момент; мощность.

М.А. Beresnev

OPTIMIZATION OF SPARK ADVANCE TO REACH THE MAXIMUM INTERNAL COMBUSTION ENGINE TORQUE BY MEANS OF BINARY FUEL

Author considers a problem of increasing internal combustion engine torque without consequent fuel consumption increase. The proposed solution is includes utilization of binary fuel with high knock rating comparing with gasoline allowing spark advance that provides reach of maximum pressure inside cylinder in necessary crankshaft rotation angle range. It's concluded that aside of torque and power increase, binary fuel helps to decrease POL expenses and emission of harmful combustion products.

Internal combustion engine; spark advance; binary fuel; torque; power.

Введение. В развитии двигателей внутреннего сгорания можно выделить несколько основных направлений: улучшение экологических показателей, увеличение экономичности и увеличение эффективности. Вместе с эффективностью растет и литровая мощность, что, с одной стороны, не может не радовать конечных