

УДК 656.3

Менакер К.В., Литвинцев А.Г. Разработка преобразователя мощности электрической энергии // Проблемы трансфера современных технологий в экономику Забайкалья и железнодорожный транспорт: Сборник трудов международной научно-практической конференции. – Чита: ЗаБИЖТ, 2011.

В статье рассмотрены вопросы создания преобразователя мощности электрической энергии для питания нагрузки большой мощности от маломощных источников тока.

Ил. 3.

Разработка преобразователя мощности электрической энергии

Дайте мне точку опоры – и я поверну Землю. (Архимед)

С давних пор в деятельности человека широкое применение находят различные устройства, значительно облегчающие подъем грузов, их транспортировку и перемещение. К таким устройствам следует отнести различные рычажные приспособления, приспособления блочного типа, домкраты, лебедки, редуктора, насосы, гидравлические и пневматические подъемники и т.д.

Перечисленные устройства нашли широкое применение за одно большое преимущество. Они позволяют осуществить выигрыш в каком-либо одном параметре за счет проигрыша в другом.

Рассмотрим принцип действия простой цепной или ременной передачи, устанавливаемой, в том числе, на велосипеде (рис. 1).

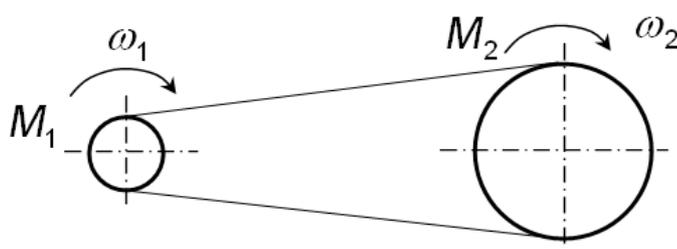


Рис. 1 Цепная или ременная передача

В случае если ведущей является звездочка или шкив малого диаметра, то получаем понижающую передачу. Шкив меньшего диаметра приводится в действие каким-либо приводом и при этом его угловая скорость выше скорости большого шкива $\omega_1 > \omega_2$ в соотношении диаметров шкивов либо числа зубьев звездочек. При этом проигрывая в скорости вращения в n раз, получаем

выигрыш в усилии – крутящем моменте $M_2 > M_1$, в такое же число раз

$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{M_2}{M_1} = n$. При ведущей звездочке или шкиве большего диаметра получаем

наоборот выигрыш в скорости вращения, но проигрыш в усилии. Рассмотренный принцип преобразования мощности положен во все механические передачи, включая лебедочные и блочные механизмы, с помощью которых осуществляли строительство всевозможных зданий и сооружений в далеком прошлом и без которых сложно представить человеческую деятельность сегодня.

Гидравлические и пневматические преобразователи мощности в виде всевозможных подъемников, насосов, кранов также основаны на рассмотренном принципе. На рис. 2 представлена конструктивная схема гидравлического домкрата. Под действием рычага приводится в действие поршень цилиндра насоса. Диаметр и объем цилиндра насоса выбирается из расчета создания максимального порционного давления в системе с помощью небольшого усилия на рукоятке.

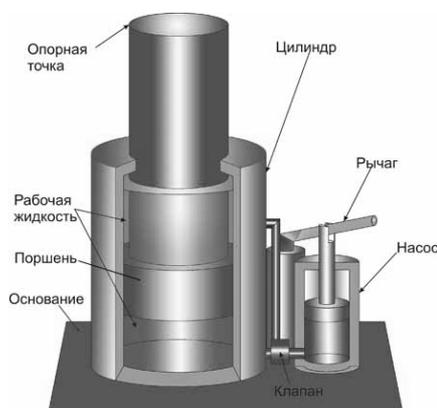


Рис. 2 Конструктивная схема гидравлического домкрата

Жидкость под давлением из цилиндра насоса через обратный клапан поступает в камеру рабочего цилиндра, диаметр которого выбирается из расчета создания необходимого усилия на штоке поршня для поднятия груза. Каждое воздействие рычага приводит к поступательному движению рабочего поршня и подъему груза на небольшое расстояние. Частое воздействие на

рычаг позволяет поднять груз на допустимую высоту. При этом проигрываем во времени подъема, зато получаем выигрыш в усилии.

В связи со сказанным встает вопрос. А можно ли создать аналогичное устройство для преобразования мощности электрической энергии, к выходу которого можно подключить мощную нагрузку при относительно небольшой потребляемой мощности. Классическая электротехника дает однозначный ответ – нельзя. Не выполняется баланс мощности, значит не соблюдается закон сохранения энергии, а значит построение такого устройства невозможно. Но ведь практически все электротехнические устройства имеют свои аналоги в механике. Да и история развития электротехнических устройств опровергает данное утверждение.

Достаточно вспомнить про автомобиль известного сербского ученого Николы Тесла, который он продемонстрировал в 1931 году, который был оснащен электродвигателем и развивал скорость до 150 км/ч. Никаких батарей или аккумуляторов на машине не было, и он ездил на ней неделю. Аппарат Тестатика, благодаря которому религиозная община в Швейцарии обеспечивает себя электроэнергией многие годы. Устройства, продемонстрированные другими изобретателями и учеными. Главная причина почему подобные устройства не нашли широкого практического применения – экономические интересы узкого круга людей. Однако, ближе к теме.

Рассмотрим конструктивную схему гидравлического подъемника, представленную на рис. 2 и попытаемся найти ее электротехнический аналог.

Первичный движитель. Первоначальное движение рычага домкрата задает человеческая рука или электродвигатель. В электротехническом образце очевидно роль первичного движителя должен выполнять источник тока или источник напряжения, предпочтительнее в виде компактного аккумулятора небольшой мощности. Поршень первичного насоса домкрата под действием рукоятки должен совершать резкие, прерывистые обратнопоступательные движения для обеспечения соответствующего высокого давления жидкости в

нагнетающем цилиндре, срабатывания обратного клапана и повышения давления в камере рабочего цилиндра, до значения, позволяющего поднять требуемый груз. Причем чем резче совершаются движения поршня насоса, тем более высокое давление создается в рабочем цилиндре, и тем эффективнее осуществляется подъем груза. Последнее заключение легко проверить опытным путем. Попробуйте накачать колесо автомобиля ручным насосом при плавном перемещении штока.

Т.е. заключаем, что оптимальной формой выходного сигнала первичного источника является импульсный сигнал с крутыми фронтами, который из постоянного сигнала, выдаваемого аккумулятором, может быть получен различными способами. Тесла в своих устройствах использовал механические прерыватели, с повышением частоты искровой промежуток с магнитной системой гашения дуги, с появлением ламп триодные управляемые коммутационные устройства.

В настоящее время большое разнообразие полупроводниковых устройств с малым временем срабатывания, измеряемое в наносекундах, рассчитанных на значительные токи и напряжения, позволяют решить задачу прерывания постоянного тока без особых затруднений.

Насос пожалуй является основной частью гидравлического домкрата. На него возложена задача создания в системе максимального порционного давления жидкости. Большое давление достигается правда за счет малого диаметра поршня насоса и за счет малого объема прокачиваемой жидкости за одно перемещение, но входное усилие движения рукоятки должно быть небольшим.

Если провести аналогию между жидкостью и электрическим током, то получается, что количество жидкости проходящей через сечение трубопровода за единицу времени эквивалентно значению тока в ветви, а разность давлений жидкости в трубопроводе соответствует разности потенциалов, т.е. напряжению. Таким образом, электротехнический аналог насоса должен

выдавать на выходе высокое напряжение при очевидном проигрыше в токе и к тому же работать на высокой частоте, т.к. от этого напрямую зависит выходная мощность устройства.

Идеальным эквивалентом насоса в электротехнике выступает катушка индуктивности. Мгновенное значение напряжения на катушке связано с током следующей известной зависимостью:

$$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

Анализ формулы (1) показывает, что в катушке индуктивности при скачкообразном изменении тока i_L значение производной тока di_L/dt будет принимать большие отрицательные значения, т.к. производная это тангенс угла наклона касательной к функции тока. При скачкообразном же изменении тока, угол наклона фронтов импульса стремиться к 90 градусам, а $tg(90^\circ) = di_L/dt \rightarrow -\infty$. При этом напряжение на катушке достигает существенных значений. Знак минус указывает на то, что катушка отдает энергию в цепь. Катушка зажигания, используемая на автомобилях явное тому доказательство. Выбор значения индуктивности и особенно ее геометрии задача непростая. Во-первых, целесообразно использование связанных индуктивностей соответственно с малым числом витков первичной и относительно большим числом витков вторичной обмотки. Это позволяет дополнительно повысить выходное напряжение в n число раз, равное отношению числа витков во вторичной и первичной обмотках и осуществить гальваническую развязку цепей. Толщина провода, используемая при намотке должна быть как можно большей с целью уменьшения потерь и повышения добротности контура.

Индуктивность обмоток L , особенно первичной, не должна быть большой, т.к. при низком входном напряжении потребуется значительное время на ее зарядку. Она не должна быть и очень низкой. Значение L напрямую зависит от расчетного выходного напряжения и мощности и рассчитывается с использованием известных выражений. Что касается геометрии связанных

катушек и наличия сердечника, то эта тема требует проведения отдельных исследований. Автор при построении опытного образца устройства использовал цилиндрический воздушный трансформатор без сердечника, т.к. он обладает малой нелинейностью характеристик, идеально работает на высоких частотах и прост в изготовлении. Тесла же в своих устройствах чаще использовал плоские бифилярные катушки, т.к. их АЧХ и ФЧХ в незначительной степени зависят от частоты. При их работе не наблюдается отставания вектора тока от напряжения и за счет бифилярной намотки они позволяют накапливать большее количество энергии (см. патенты Тесла). Преимущества плоских катушек конечно очевидны, они широко используются в высокочастотной технике, были проверены и автором. Но при работе с ними требуется определенный опыт и знания. Не стоит сбрасывать со счетов и тороидальные катушки с ферритными сердечниками, которые успешно используют в импульсной технике, но как было замечено, данный вопрос требует проведения дополнительных исследований.

Обратный клапан является вторым по значимости устройством. Он выполняет функцию удержания жидкости под давлением в полости рабочего цилиндра, одновременно осуществляя развязку первичной и вторичной цепей и одностороннее поступление жидкости в рабочий цилиндр. От надежности его работы зависит надежность всего устройства. Поломка данного устройства приводит к резкому опусканию штока рабочего цилиндра и соответственно груза. Клапан должен выдерживать высокое давление поступающей от насоса жидкости и обратное давление со стороны рабочего цилиндра. Электротехническим аналогом данного устройства может служить полупроводниковый диод, обладающий большим быстродействием – диод Шотки. При этом как было сказано ранее, он должен выдерживать высокое прямое и обратное напряжение и открываться от уровня напряжения, возникающего на выходе катушки (насоса). Тесла в своих разработках в качестве обратного клапана нередко использовал односторонние искровые

промежутки и одностороннее магнитное действие плоских бифилярных катушек, которые использовал как вторичные обмотки воздушного трансформатора (см. патенты Тесла).

Полость рабочего цилиндра является своего рода накопителем жидкости. При достижении уровня давления в полости рабочего цилиндра, достаточного для подъема груза шток цилиндра начинает ступенчатое поступательное движение. В роли накопителя электрической энергии в данном случае идеально подходит конденсатор. Напряжение на емкости при внешнем воздействии в виде импульса тока $i_c = A_u \cdot \delta(t)$ определяется выражением:

$$u_c = u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = \frac{A_u}{C} \cdot 1(t) . \quad (2)$$

Напряжение скачком увеличивается от начального значения до A_u/C и далее сохраняет это значение. Значение тока на выходе связанных катушек за один такт конечно небольшое, как и объем жидкости на выходе насоса. Зато высокое напряжение (давление) на выходе воздушного трансформатора приводит к появлению конечного напряжения (давления) на емкости. Причем главным достоинством емкости является ее свойство накопления заряда. Емкость в данном случае работает как интегратор напряжения (заряда) точно также как давление в рабочем цилиндре домкрата достигает своего максимального давления через определенное число движений штока насоса. За счет высокой частоты входного сигнала зарядка емкости осуществляется относительно быстро. Причем следует отметить, что если у домкрата повышение частоты воздействия на рукоятку имеет явный физический предел, то в электротехнических устройствах увеличение частоты до мегагерцовых значений не представляет особых трудностей. Следует, однако, отметить, что выходные конденсаторы, используемые в преобразователе должны обладать достаточным запасом по напряжению, соответствующим напряжению на выходе трансформатора (насоса). Их емкость должна быть рассчитана из

условия непревышения рабочего значения выходного напряжения устройства и времени зарядки на основе типовых выражений.

Отличительным устройством преобразователя мощности электрической энергии от домкрата является выходной клапан, в качестве которого может быть с успехом использован силовой диод или электронный ключ. По мере накопления энергии в конденсаторе он должен быть периодически разряжен на нагрузку естественно через цепи стабилизации и фильтрации. Частота разрядки конденсатора должна быть ниже частоты входного сигнала. Отношение данных частот отчасти и определяет соотношения входной и выходной мощности устройства. Баланс мощности при этом соблюдается. Необходимо только учитывать частоты входного и выходного сигналов. Выигрываем в мощности, проигрываем в частоте.

Автором был собран опытный образец преобразователя мощности. В качестве нагрузки использовались лампы накаливания напряжением 220 В, включенные параллельно суммарной мощностью от 1 до 14 кВт. Потребляемый ток при уровне напряжения источника 12 В не превысил 6 А. Пиковое значение выходного тока при максимальной нагрузке в 14 кВт составило порядка 75 А. Частота входного и выходного сигналов составила соответственно 100 и 10 кГц. Причем частота выходного сигнала может быть уменьшена еще.

В известной программе электронного моделирования Multisim 11.0 была собрана имитационная модель созданного преобразователя мощности. Погрешность моделирования не превысила 5 %, что лишний раз подтверждает правильность изложенного. Осциллограмма изменения напряжения выходного конденсатора преобразователя, полученная в программе Multisim 11.0 приведена на рис. 3.

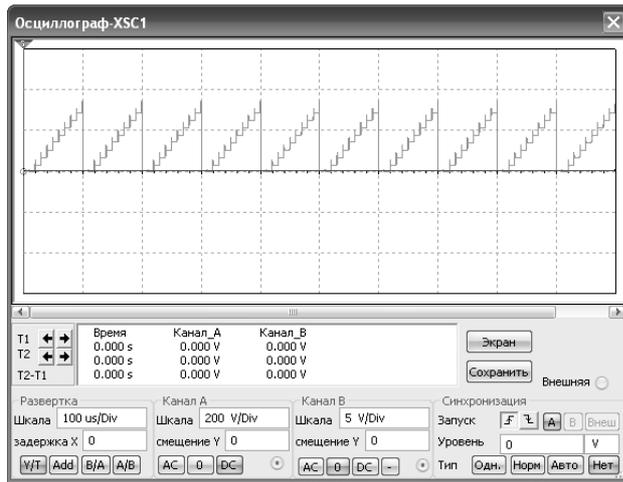


Рис. 3 Осциллограмма изменения напряжения выходного конденсатора