

УДК 621.318.3

*С. Н. Запольских, А. А. Борисов, А. Г. Хлебов*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАКОПЛЕНИЕМ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ НА ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЯХ**

В статье рассмотрены исследования на численных моделях энергетических характеристик электромеханических систем с предварительным накоплением магнитной энергии на примере электрических двигателей. В этих системах энергопреобразование осуществляется при постоянном потокосцеплении. За основу программ численных моделей взяты уравнения механики и электромагнетизма, в которых учитывается активное сопротивление обмотки, нелинейность кривых намагничивания сердечников, магнитные потоки рассеяния и ряд других факторов, влияющих на работу двигателя. Уравнения энергий используются в виде дифференциальных уравнений, которые включены в общую систему основных уравнений. Программы численных моделей составлены на языке математической системы MathCAD. Результаты представлены в виде графиков зависимостей энергий от времени. Было получено, что при одновременном уменьшении длительности питающего напряжения и увеличении его амплитуды возрастает работа электромагнитных сил и мощность двигателя. Рассмотрены особенности, связанные с проведением подобных численных экспериментов и, пути преодоления возникающих, при этом, трудностей.

*Ключевые слова:* электромагнитные системы, накопители магнитной энергии, моделирование.

Исследование энергетических характеристик проведено на примере электрических двигателей. Электрические двигатели с предварительным накоплением магнитной энергии могут найти применение в системах управления в машиностроении, сварочном производстве и для других целей. Материалы статьи могут быть использованы так же и в учебных целях при составлении программ

численных моделей на языке математической системы MathCAD и при проведении численных экспериментов на этих моделях.

Физические численные модели электрических двигателей с предварительным накоплением магнитной энергии представляют собой программы, составленные в данном случае с помощью математических пакетов программ MathCAD, в основе которых лежат физические процессы, происходящие в двигателях, представленные в виде уравнений [1]. Математические системы MathCAD позволяют записать свойства любого исследуемого объекта в виде математических соотношений, в привычном, как это принято в научно-технической литературе виде, и решать системы дифференциальных, алгебраических, нелинейных и другие типов уравнений. Адекватность любой численной модели реальному объекту зависит от учета факторов, влияющих на его работу и точностью описания его уравнениями и математическими соотношениями. Разработка численных моделей представляет собой многоэтапный процесс. По мере получения данных численная модель уточняется, вводятся неучтенные факторы, уточняются математические соотношения, и модель постепенно приближается к реальному объекту. Понятно, что разработка и исследование реального объекта требует высококвалифицированных специалистов: конструкторов, специалистов по электронике и системам управления, программистов и, наконец, хороших экспериментаторов. Кроме того, для этих целей нужна научно-производственная база с высококвалифицированным обслуживающим персоналом. Исследование на численных моделях не требует всего этого и с помощью численных моделей можно исследовать и выявить свойства объекта, которые невозможно осуществить на реальных объектах.

За основу программ численных моделей были взяты уравнения механики и электромагнетизма, учитывающие магнитные потоки рассеяния, активное сопротивление обмотки, нелинейность кривых намагничивания сердечников и ряд других факторов, влияющих на работу двигателя. Численные модели имеют конструктивную схему, приведенную на рис. 1. Элементы численной моде-

ли двигателя имеют следующие размеры:  $a=20 \cdot 10^{-3}$  м,  $b=20 \cdot 10^{-3}$  м,  $L=20 \cdot 10^{-3}$  м,  $h=56 \cdot 10^{-3}$  м,  $\delta_1=10 \cdot 10^{-3}$  м,  $\delta_2=0,25 \cdot 10^{-3}$  м. Питание двигателя осуществляется прямоугольными импульсами напряжения. Импульс напряжения подается в положении вторичной части с максимальным магнитным сопротивлением  $x=0$ . Между полюсами первичной и вторичной части создается магнитное поле и накапливается магнитная энергия. После подачи импульса напряжения обмотка замыкается накоротко и происходит преобразование накопленной магнитной энергии в механическую работу и кинетическую энергию почти при постоянном потокосцеплении. Амплитуда импульса напряжения во всех экспериментах подбиралась так, чтобы максимальная индукция магнитного поля в сердечниках с приближением до трех верных знаков была равна  $B_{MAX}=1,6$  Тл.

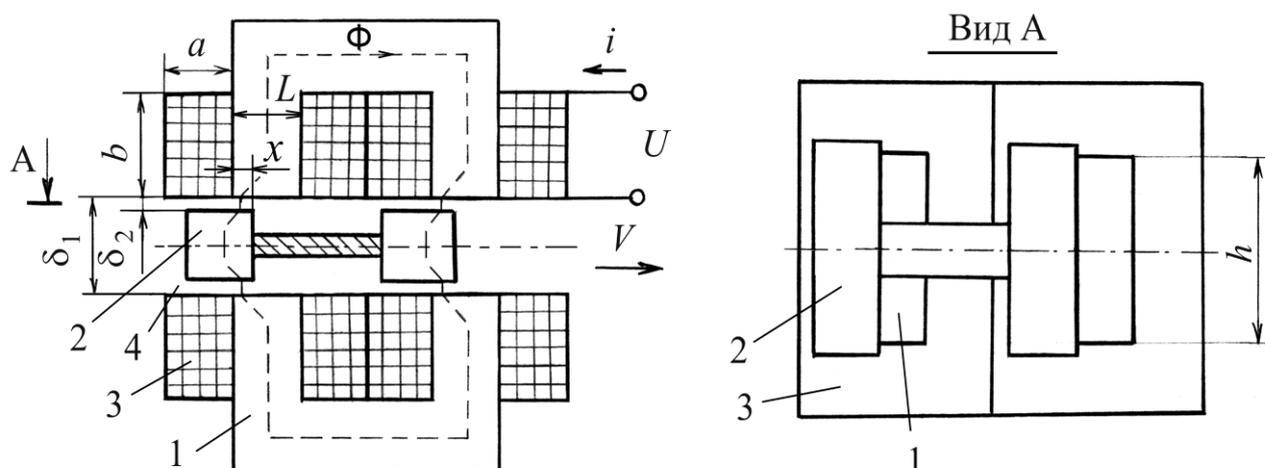


Рис. 1. Конструктивная схема численных моделей двигателя: 1 – первичная часть; 2 – вторичная часть; 3 – обмотка; 4 – рабочий зазор

На рис. 2 приведены зависимости энергетических характеристик от времени. Во время подачи импульса напряжения от 0 до  $t_p$  за счет работы источника питания  $W_E$  происходит накопление магнитной энергии  $W_M$ , состоящей из магнитной энергии рабочих зазоров  $W_{M\delta}$ , сердечников магнитопровода  $W_{MM}$  и потоков рассеяния  $W_{MD}$ , при этом уже совершается работа электромагнитной силы  $W_{AM}$ . Часть энергии теряется в проводах обмотки  $W_D$  и в сердечниках

магнитопровода  $W_F$ . После подачи импульса напряжения увеличение энергии от источника питания прекращается, чему соответствует прямая линия на графике для работы источника питания  $W_E$ , параллельная оси абсцисс, а работа электромагнитной силы  $W_{AM}$  совершается только за счет накопленной магнитной энергии  $W_M$ , при этом магнитная энергия убывает, а работа электромагнитной силы увеличивается. Часть магнитной энергии так же теряется в проводах обмотки и сердечниках магнитопровода. После завершения такта работы, в нейтральном положении вторичной части часть магнитной остается не израсходованной. Были получены следующие параметры и характеристики двигателя. Длительность импульса напряжения  $t_p=5,9 \cdot 10^{-3}$ с; амплитуда прямоугольного импульса напряжения, обеспечивающая значение индукции магнитного поля в рабочем зазоре  $B=1,6$ Тл, равно  $U=126$ В; работа электромагнитной силы, включающая механическую работу и кинетическую энергию  $W_{AM}=10,1$ Дж; КПД  $\eta_1=0,731$ ; КПД с учетом того, что оставшаяся магнитная энергия в нейтральном положении вторичной части  $W_M=2,43$ Дж может быть использована в последующем цикле работы двигателя [2] составляет  $\eta_2=0,887$ ; время движения вторичной части из начального положения в нейтральное составляет

$t_l=11,4 \cdot 10^{-3}$ с. Если взять время возвращения вторичной части в исходное положение или идентичное последующее положение равным рабочему такту, то частота работы двигателя составляет  $f=43,9$ Гц, а мощность двигателя  $P=445$ Вт, при этом тепловые потери в обмотке  $P_D=56,4$ Вт. Для такой длительности импульса напряжения только часть работы источника питания  $W_{EP}=13,8$ Дж преобразуется в магнитную энергию  $W_{MP}=7,66$ Дж, и во время действия импульса напряжения работа электромагнитной силы уже составляет  $W_{AMP}=5,17$ Дж.

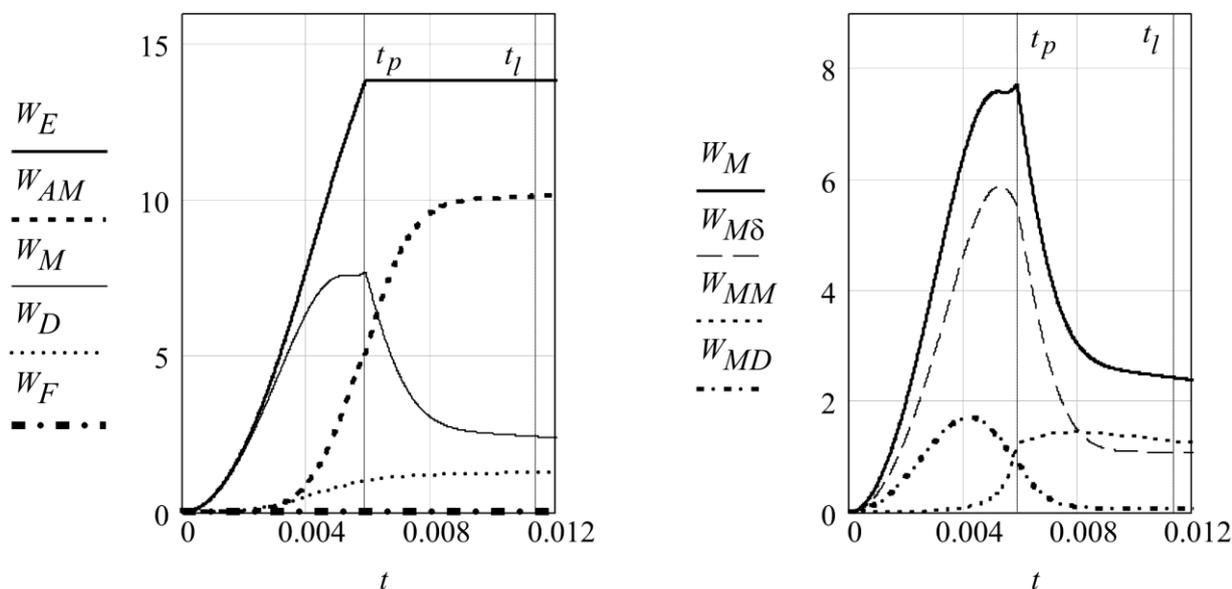


Рис. 2. Энергетические характеристики двигателя для длительности импульса напряжения  $t_p=5,9 \cdot 10^{-3} \text{ с}$

При уменьшении длительности импульса напряжения повышается эффективность работы двигателя, при этом возникает возможность увеличить амплитуду импульса напряжения. На рис. 3 приведены энергетические зависимости для более короткого импульса напряжения. В этом случае в конце импульса напряжения почти вся работа источника питания  $W_{EP}=17,4 \text{ Дж}$  расходуется на накопление магнитной энергии  $W_{MP}=15,2 \text{ Дж}$  и только небольшая часть  $W_{AMP}=1,36 \text{ Дж}$  на работу электромагнитной силы. Были получены следующие параметры и характеристики двигателя. Амплитуда прямоугольного импульса напряжения, обеспечивающая максимальное значение индукции магнитного поля в рабочем зазоре  $B=1,6 \text{ Тл}$ , равно  $U=262 \text{ В}$ ; работа электромагнитной силы, включающая механическую работу и кинетическую энергию  $W_{AM}=13,2 \text{ Дж}$ ; КПД  $\eta_1=0,757$ ; КПД с учетом того, что оставшаяся магнитная энергия в нейтральном положении вторичной части  $W_M=2,45 \text{ Дж}$  используется в последующем цикле работы [2] составляет  $\eta_2=0,816$ ; время движения вторичной части из начального положения в нейтральное  $t_l=9,09 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ . Частота работы двигателя составляет  $f=55 \text{ Гц}$ , а мощность двигателя  $P=725 \text{ Вт}$ , при этом тепловые потери в обмотке равны  $P_D=96,2 \text{ Вт}$ .

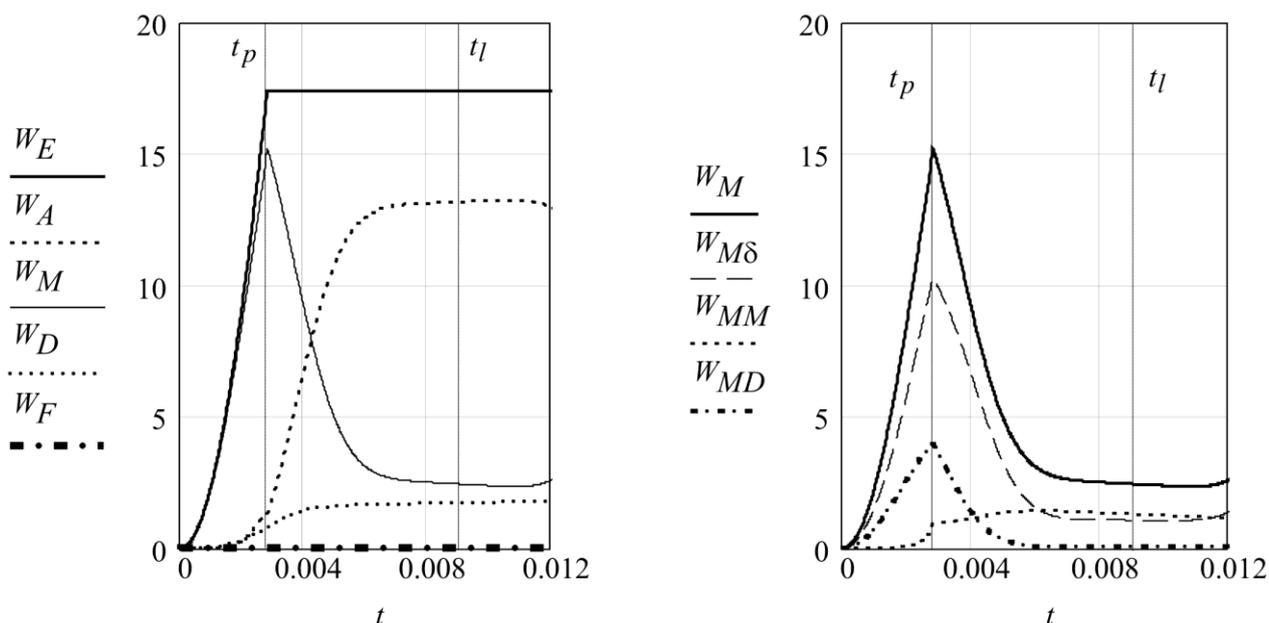


Рис. 3. Энергетические характеристики двигателя для длительности импульса напряжения  $t_p=2,84 \cdot 10^{-3}$  с

Из полученных данных следует, что с уменьшением длительности импульса напряжения и при одновременном увеличении его амплитуды возрастет накопленная магнитная энергия, при этом на выходе возрастает работа электромагнитной силы и мощность двигателя.

Накапливаемая магнитная энергия состоит из трех частей: магнитной энергии в рабочих зазорах, магнитной энергии сердечников магнитопровода и магнитной энергии магнитных потоков рассеяния. Магнитная энергия потоков рассеяния, которая оказывается максимальной в конце действия импульса напряжения  $W_{MDP}=3,96$  Дж, получилась довольно большой по отношению к магнитной энергии в рабочих зазорах  $W_{M\delta P}=10,3$  Дж, которая тоже максимальна в конце действия импульса напряжения. После подачи импульса напряжения эти обе энергии убывают, то есть, за счет их совершается работа электромагнитной силы. Казалось бы, что магнитные потоки рассеяния играют положительную роль, так как и за счет магнитной энергии потоков рассеяния совершается работа электромагнитной силы, но на самом деле не совсем так, энергетические характеристики, как показывают исследования [1], с учетом потоков рассеяния хуже, хотя и не очень сильно, чем без их учета.

Особенностью двигателей с предварительным накоплением является то, что магнитная энергия в рабочих зазорах и магнитная энергия сердечников магнитопровода не расходуются полностью на работу электромагнитной силы, а ее часть остается в конце такта работы двигателя. При этом на вторичную часть действует электромагнитная сила, которая препятствует дальнейшему движению или возвращению ее в исходное положение. Поэтому остающаяся магнитная энергия в конце такта работы двигателя должна быть обязательно, каким либо способом, израсходована. В работе [2] эта оставшаяся магнитная энергия преобразуется в электрическую энергию конденсатора, которая используется в последующем цикле работы, при этом вторичная часть может беспрепятственно двигаться дальше и, кроме того, возрастает КПД двигателя.

На рис. 4 в более крупном масштабе приведены графики потерь энергии в проводах обмотки и сердечниках магнитопровода. Потери в сердечниках оказались значительно меньше потерь в проводах обмотки. Проверка выводов расчетных формул [1] пока не выявила никакой ошибки. Малые потери в сердечниках можно объяснить тем, в двигателях с накоплением энергии не происходит перемагничивание сердечников магнитопровода, поэтому нет потерь энергии на гистерезис, кроме того энергопреобразование большую часть времени происходит при почти постоянном магнитном потоке и вихревые токи появляются только во время подачи импульса напряжения.

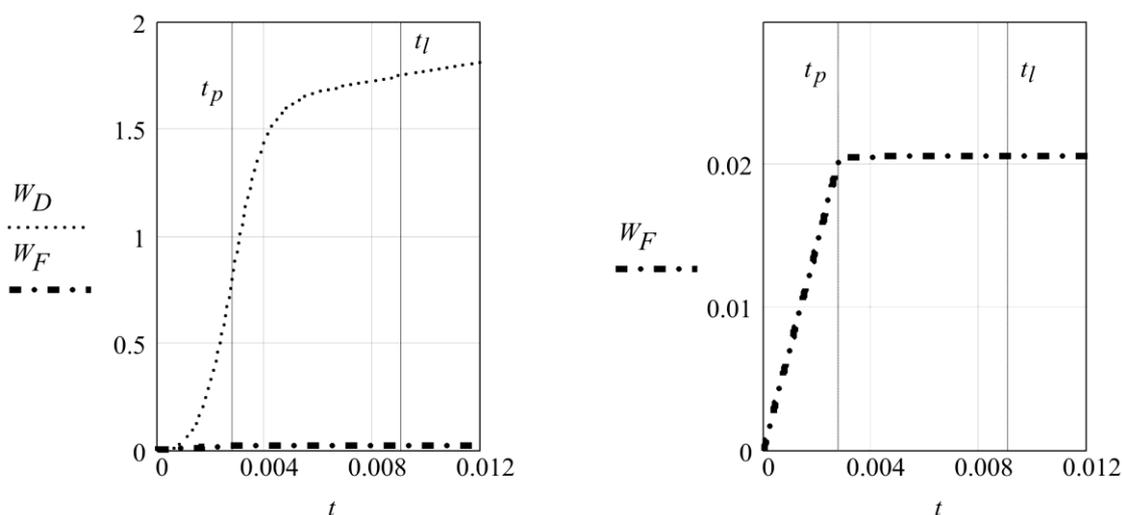


Рис. 4. Потери энергий в проводах обмотки и сердечниках магнитопровода

Амплитуда импульса напряжения в обоих экспериментах, как уже отмечалось, подбиралась так, чтобы максимальная индукция магнитного поля в сердечниках с приближением до трех верных цифр была равной  $B_{MAX}=1,6$ Тл. К сожалению, не удалось составить такую программу, чтобы делать такой подбор автоматически. В общем-то, это дело хороших математиков и программистов по системе MathCAD, если вообще возможно такое сделать с помощью системы MathCAD. Поэтому было необходимо запускать программу многократно с различными значениями амплитуды импульса напряжения, которые постепенно вручную подбирались так, чтобы индукция магнитного поля приближалась к  $B_{MAX}=1,6$ Тл. Казалось бы, что это длительная процедура, но она на самом деле занимает всего лишь несколько минут, при этом для запуска самой программы и выдачи результатов каждый раз требовалось всего лишь несколько секунд.

Приближение сходимости рекуррентных формул в системе MathCAD была взята до четырех верных цифр. Интервал независимой переменной времени при численном решении системы дифференциальных уравнений разбивался на тысячу одинаковых частей, поэтому можно сказать, что время определялось с приближением до трех верных цифр. Учитывая так же, что максимальное значение индукции магнитного поля подбиралось с приближением тоже до трех верных цифр, то все результаты для данной математической модели представлены с приближением до трех верных цифр.

На рис. 5 показаны зависимости индукции магнитного поля в сердечниках от времени для первого и второго случая. Как и должно быть для таких двигателей индукция магнитного поля, следовательно, и магнитный поток в сердечниках магнитопровода, возрастают только во время подачи импульса напряжения и дальше остаются почти постоянными.

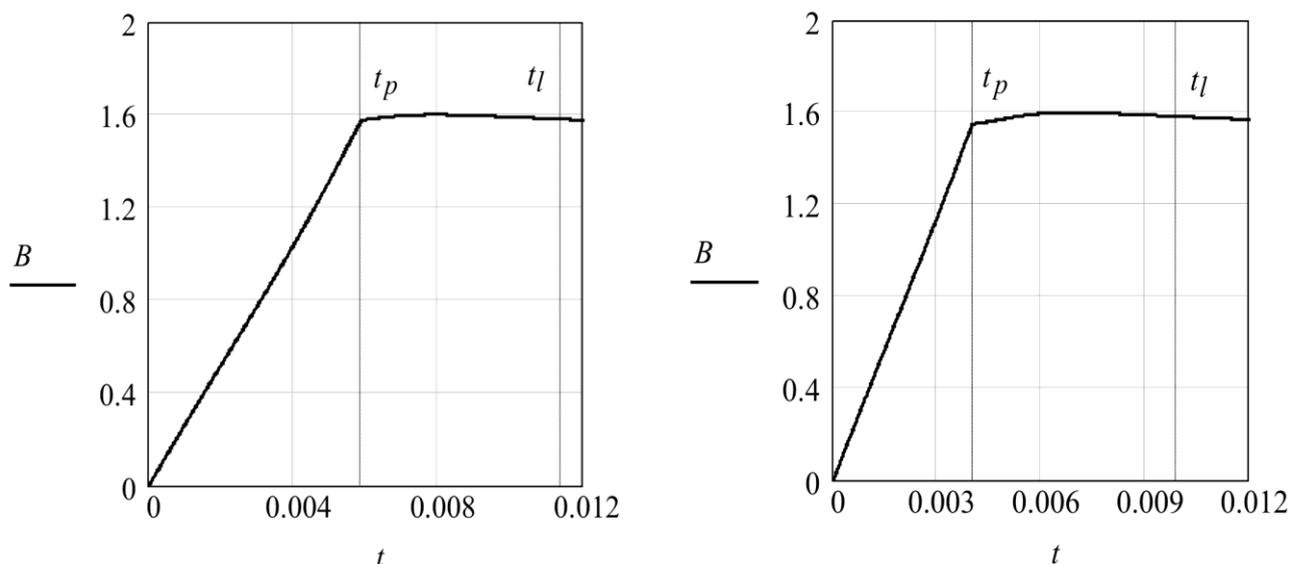


Рис. 5. Индукция магнитного поля в сердечниках магнитопровода

Форма импульсов напряжения приведена на рис. 6. Так же указаны время такта работы двигателя  $t_{l1}$  и  $t_{l2}$ . Здесь цифра один соответствует первому случаю энергетических преобразований (рис. 2), а цифра два второму (рис. 3).

Как уже отмечалось, при уменьшении длительности импульсов амплитуда напряжения может быть увеличена без боязни магнитного перенасыщения сердечников. Изменением амплитуды и длительности импульсов напряжения можно регулировать частоту работы двигателя и развиваемые усилия. С этой целью в системе управления двигателем должен присутствовать, кроме датчиков положения, датчик индукции магнитного поля. Функцию положения могут выполнять датчики электрического тока и скорости изменения электрического тока.

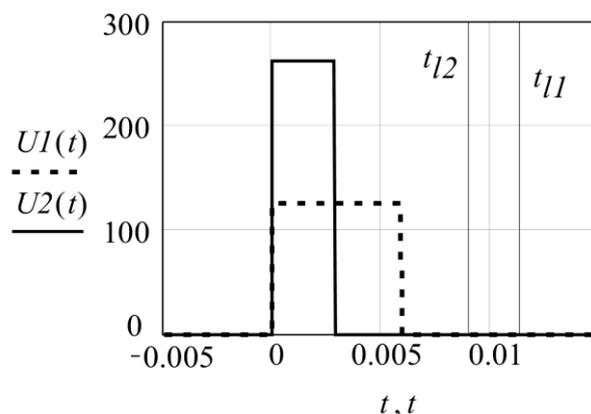


Рис. 6. Форма импульсов напряжения источника питания

С помощью численных моделей, как и в реальном эксперименте, может быть проводится серия экспериментов. В этом случае программа запускается многократно с различными входными данными. По полученным численным данным могут быть построены графики для любых величин, входящих в уравнения. В системе MathCAD есть функции интерполяции и регрессии, с помощью которых дискретные данные можно представить непрерывными зависимостями, по которым можно не только строить графики, но проводить с этими зависимостями различные математические действия: дифференцирование, интегрирование, использование снова в дифференциальных уравнениях. Так, например, в работе [1] построены графики зависимостей энергетических характеристик от длительности импульсов напряжения.

Таким образом, с помощью численной модели подробно рассмотрены энергетические преобразования в электрических двигателях с предварительным накоплением магнитной энергии и приведены энергетические характеристики таких двигателей. При одновременном уменьшении длительности питающего напряжения и увеличением его амплитуды увеличивается работа электромагнитной силы и мощность двигателя, немного снижается КПД. Рассмотрены особенности, связанные с проведением подобных численных экспериментов и пути преодоления, возникающих, при этом, трудностей.

### Список литературы

1. *Запольских С. Н.* Импульсные системы с индуктивными накопителями энергии. Киров: ПРИП ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2012. 121 с.
2. Патент РФ № 2560079. Электрический двигатель / С. Н. Запольских, А. А. Борисов // БИ. 2015. № 23.

**ЗАПОЛЬСКИХ Сергей Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной физики, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: zapose@mail.ru

**БОРИСОВ Александр Анатольевич** – инженер проблемной лаборатории ММВВС, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: vgu-sopromat@mail.ru

**ХЛЕБОВ Алексей Георгиевич** – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой инженерной физики, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: ag\_hlebov@vyatsu.ru