

Работы по совершенствованию конструкций лифтового оборудования успешно продолжают. Они охватывают широкий круг проблем, связанных с совершенствованием систем управления, средств оперативной диагностики и диспетчеризации на базе компьютерных технологий.

Технический прогресс в смежных отраслях открывает конструкторам лифтового оборудования новые возможности и предопределяет появление новых, порой неожиданных технических подходов и решений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Г.Г.** Современные тенденции совершенствования конструкции лифтового оборудования// М: изд. МГСУ, 2006.

*Ю.Н. СОХОП*

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ SPICE-МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЕНЗОРНЫМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрен математический аппарат, позволяющий автоматизировать процесс разработки моделей электрических машин для SPICE-программ при исследованиях динамических процессов в управляемых электроприводах. Приведен пример получения модели асинхронного двигателя в 3-х фазной системе координат для статорных обмоток и 2-х фазной системе координат для роторных обмоток. Приводятся операторы автоматизированного вывода формул в пакете символьной математики Maxima. Полученные модели асинхронного двигателя реализованы в пакете LTspice, применяемом в лабораторных работах по дисциплине автоматизация исследований электроприводов.

Программа моделирования электронных устройств Spice появилась на рубеже 70-х годов и со временем получила широкое распространение в различных вариантах: PSpice, XSpice, B2Spice, MicroCap и т.п. Фактически входной язык для Spice-программ стал мировым стандартом описания устройств электроники в системах сквозного автоматизированного проектирования, использующим этап моделирования (системах CAE/CAD/CAM). К таким системам относятся такие коммерческие пакеты, как PCAD, OrCAD, DesignLAB и т.п. Из некоммерческих пакетов подобного класса можно отметить систему KiCAD, позволяющую автоматически генерировать Spice-описание принципиальной электрической схемы.

В библиотеку встроенных моделей Spice-программ входят, как правило, все основные элементы электрических схем – линейные и нелинейные R, L, C ветви, управляемые источники, взаимные индуктивности; модели основных типов полупроводниковых приборов – диодов, транзисторов и т.п., а так же модели цифровых устройств - элементы базовой логики, триггеры и т.д. Набор встроенных моделей позволяет исследовать функционирование основных узлов электронных систем управления электроприводами и включать полученные результаты в их сквозное проектирование. Так как основное назначение Spice-программ – моделирование электронных устройств, то электрические машины не входят в библиотечные описания. Вместе с тем, базовый набор встроенных моделей позволяет получить необходимые схемы замещения. В статье изложен способ автоматизированного вывода расчетных формул схем замещения электрических машин, основанный на теории обобщенной электрической машины [1].

Уравнения напряжений обобщенной электрической машины, как известно [1], приводятся в двухфазной системе координат:

$$U = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + G_x \cdot i \quad (1)$$

здесь  $U$  – вектор приложенных напряжений,  $i$  – вектор токов,  $\omega$  – механическая скорость вращения,  $L$  – матрица индуктивностей,  $R$  – матрица сопротивлений двигателя. В матрице э.д.с.  $G_x$ , скорость вращения ротора в эл. рад.  $\omega$  может быть вынесена в виде отдельного множителя:

$$G_x = \omega G, \quad (2)$$

Уравнение механического движения:

$$J \cdot \frac{d\omega_{mex}}{dt} = M_{\text{дв}} - M,$$

где  $\mathbf{M}$  – внешний момент, приложенный к валу машины,

$\mathbf{J}$  – момент инерции,

$\omega_{\text{мех}}$  - скорость вращения ротора в механических радианах,

$\omega = Z_p \omega_{\text{мех}}$ ,  $Z_p$  – число пар полюсов.

Момент, развиваемый двигателем  $M_{\text{дв}}$ , определяется обобщенной формулой:

$$M_{\text{дв}} = Z_p \cdot i_t \cdot G \cdot i, \quad (3)$$

где  $t$  – знак транспонирования.

Преобразование уравнений (1), (2) и (3) к новой системе координат выполняется тензором преобразований  $\mathbf{C}$ , связывающего токи  $\mathbf{i}$  в старой системе координат с токами  $\mathbf{i}'$  в новой системе координат по формуле:

$$\mathbf{i} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{i}'$$

В соответствии с правилами тензорного исчисления, компоненты уравнений в новой системе координат, которая далее обозначена символами со штрихами, формируются по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} U' &= C_t \cdot U \\ R' &= C_t \cdot R \cdot C \\ L' &= C_t \cdot L \cdot C \\ G_x' &= C_t \cdot G_x \cdot C + C_t \cdot L \cdot dC/dt \\ G' &= G_x' / \omega \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, если заданы уравнения электрической машины в некоторой исходной системе координат (1)- (3), то по соотношениям (4) можно переформировать уравнения для новой системы координат. Так как формулы (4) универсальны, то их можно применить для автоматизированного формирования уравнений напряжений и момента для широкого класса координатных систем: вращающихся, неподвижных, многофазных и т.д.

В новой системе координат форма уравнений (1) и (3) остается без изменений:

$$U' = R' \cdot i' + L' \cdot \frac{di'}{dt} + G_x' \cdot i' \quad M_{\text{дв}} = Z_p \cdot i_t' \cdot G' \cdot i', \quad (5)$$

Преобразования (4) оставляют так же мощность электрической машины без изменения:

$$P = P' = U_t \cdot i = U_t' \cdot i'.$$

Применим приведенные формулы для автоматизированного вывода уравнений асинхронного короткозамкнутого двигателя для моделирования его совместной работы с трехфазными источниками питания. Исходной системой координат пусть будет неподвижная двухфазная система, новой системой координат – трехфазная система для обмоток статора и двухфазная система для обмоток ротора.

Для выполнения условия неизменной мощности двигателя в старой и новой системах координат, матрица преобразований  $\mathbf{C}$  должна быть квадратной. С этой целью вводится дополнительная координата нулевой последовательности для статорной обмотки (для получения уравнений двигателя с трехфазной роторной обмоткой, необходимо ввести обмотку нулевой последовательности для ротора).

Для автоматизированного получения состава матриц в уравнениях (5), был использован свободный для распространения пакет символьной математики **Maxima** (лицензия GPL, [2]).

Исходной информацией для вывода формул являются матрицы  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{G}_x$  уравнения (1) и матрица преобразований  $\mathbf{C}$  к статорной трехфазной системе координат. Эти матрицы вводятся вручную в соответствии с правилами работы в математическом пакете:

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{os} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & 0 & L_m \\ 0 & 0 & L_{os} & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad G_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega L_m & 0 & 0 & \omega L_r \\ -\omega L_m & 0 & 0 & -\omega L_r & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

В матрицах **R**, **L** и **Gx** координаты (строки и столбцы) расположены в следующей последовательности:  $\alpha, \beta, 0, \alpha, \beta$ . В такой же последовательности перечислены координаты строк матрицы **C**. Координаты столбцов матрицы **C** расположены в такой последовательности:  $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \alpha, \beta$ . Сопротивления статорных обмоток по осям  $\alpha$  и  $\beta$  равны **Rs**, сопротивление статорной обмотки нулевой последовательности – **Ros**, сопротивления обмоток ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$  равны **Rr**, индуктивности статорных обмоток по осям  $\alpha$  и  $\beta$  равны **Ls**, индуктивность статорной обмотки нулевой последовательности **Los**, индуктивности обмоток ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$  равны **Lr**. Индуктивность намагничивания – **Lm**.

Преобразование матрицы сопротивлений **R** по формуле (4), в системе **Maxima** может иметь следующий формат:

```
/*вывод матрицы сопротивлений в новой системе координат*/
Rfaz:=Rx : trigsimp ( transpose(C) . R . C );
```

В пакете **Maxima** фактическое присваивание выполняется оператором двоеточие, символы '**Rfaz=**' в начале строки предназначены здесь для удобства чтения вывода.

В результате получаем матрицу сопротивлений в 3-х фазной системе координат для статора:

$$Rfaz = \begin{bmatrix} \frac{4R_s + R_{os}}{9} & -\frac{2R_s - R_{os}}{9} & -\frac{2R_s - R_{os}}{9} & 0 & 0 \\ -\frac{2R_s - R_{os}}{9} & \frac{4R_s + R_{os}}{9} & -\frac{2R_s - R_{os}}{9} & 0 & 0 \\ -\frac{2R_s - R_{os}}{9} & -\frac{2R_s - R_{os}}{9} & \frac{4R_s + R_{os}}{9} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Диагональные элементы для статорных координат должны быть равными **Rf** – сопротивлению фазы статора трехфазной машины в соответствии с паспортными данными. Недиагональные элементы матрицы сопротивлений должны быть равными нулю. Таким образом, для статорных обмоток должны быть справедливыми следующие соотношения:

$$\begin{cases} \frac{4R_s + R_{os}}{9} = R_f, \\ -\frac{2R_s - R_{os}}{9} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

В математическом пакете **Maxima** решение системы (6) и одновременная замена элементов матрицы сопротивлений может быть выполнена тремя операторами:

```
/*для назначения переменным результатов вычислений вводится опция*/
globalsolve: true$
```

```
/*ввод и решение уравнений для фазных сопротивлений*/
```

```
sol1: solve([(4*Rs+Ros)/9=Rf, (Ros-2*Rs)/9=0], [Rs, Ros]);
```

$$[[ [Rs : \frac{3Rf}{2}, Ros : 3Rf ] ]]$$

```
/*переформирование матрицы сопротивлений*/
```

```
Rx:ev(Rx);
```

В результате получаем матрицу сопротивлений в фазной системе координат и одновременно связь сопротивлений двухфазной и трехфазной машин:

$$Rf = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, \quad R_s = 3/2R_f, \quad R_{os} = 3R_f \quad (7)$$

Формирование индуктивности выполним аналогичным образом:

```
/*вывод матрицы индуктивности в новой системе координат*/
```

```
Lx : trigsimp(transpose(Cz) . Lz . Cz);
```

В результате получаем матрицу индуктивностей в трехфазной системе координат:

$$L_{f\alpha z} = \begin{bmatrix} \frac{4L_s + L_{os}}{9} & -\frac{2L_s - L_{os}}{9} & -\frac{2L_s - L_{os}}{9} & \frac{2L_m}{3} & 0 \\ -\frac{2L_s - L_{os}}{9} & \frac{4L_s + L_{os}}{9} & -\frac{2L_s - L_{os}}{9} & -\frac{L_m}{3} & \frac{L_m}{\sqrt{3}} \\ -\frac{2L_s - L_{os}}{9} & -\frac{2L_s - L_{os}}{9} & \frac{4L_s + L_{os}}{9} & -\frac{L_m}{3} & -\frac{L_m}{\sqrt{3}} \\ \frac{2L_m}{3} & -\frac{L_m}{3} & -\frac{L_m}{3} & L_r & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{\sqrt{3}} & -\frac{L_m}{\sqrt{3}} & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

Потребуем выполнения следующих условий:

$$\begin{aligned} \frac{4L_s + L_{os}}{9} &= L_f, \\ -\frac{2L_s - L_{os}}{9} &= 0; \end{aligned} \quad (8)$$

где  $L_f$  – сопротивление фазы статора трехфазной машины в соответствии с паспортными данными. Решение системы уравнений (8) выполняется оператором:

**/\*ввод и решение уравнений для фазных индуктивностей\*/**  
`sol1 : solve([(4*Ls+Los)/9=Lf, (Los-2*Ls)/9=0], [Ls, Los]);` [ [ Ls :  $\frac{3L_f}{2}$ , Los :  $3L_f$  ] ]

Результат решения показывает, что статорные индуктивности фаз двухфазной машины должны быть в полтора раза больше статорных индуктивностей эквивалентной по мощности трехфазной машины. Такое же соотношение должно быть и для индуктивности намагничивания:

$$L_m = 3/2 L_{mf},$$

поэтому вводится оператор

**/\*переопределение индуктивности намагничивания\*/**  
`Lm:3/2*Lmf;`

После введенных дополнений окончательно получаем выражение для индуктивностей асинхронного двигателя:

**/\*переформирование матрицы индуктивностей\*/**  
`Lf=Lx:ev(Lx);`

$$L_f = \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 & L_{mf} & 0 \\ 0 & L_f & 0 & -\frac{L_{mf}}{2} & \frac{3L_{mf}}{2\sqrt{3}} \\ 0 & 0 & L_f & -\frac{L_{mf}}{2} & -\frac{3L_{mf}}{2\sqrt{3}} \\ L_{mf} & -\frac{L_{mf}}{2} & -\frac{L_{mf}}{2} & L_r & 0 \\ 0 & \frac{3L_{mf}}{2\sqrt{3}} & -\frac{3L_{mf}}{2\sqrt{3}} & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

Так как матрица преобразований является постоянной, то ее производная по времени равна нулю, поэтому формула вывода матрицы э.д.с. упрощается:

**/\*вывод матрицы э.д.с. в новой системе координат\*/**  
`Gx:trigsimp(transpose(Cz) . Gz . Cz);`  
**/\*переформирование матрицы э.д.с.\*/**  
`Gfx=Gx:ev(Gx);`

В результате получаем:

$$G_{fx} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3\omega L_{mf}}{2\sqrt{3}} & -\frac{3\omega L_{mf}}{2\sqrt{3}} & 0 & \omega L_r \\ -\omega L_{mf} & \frac{\omega L_{mf}}{2} & \frac{\omega L_{mf}}{2} & -\omega L_r & 0 \end{bmatrix} \quad 10)$$

Для получения матрицы момента, надо матрицу э.д.с. разделить на скорость ротора:  
 $G_{xx} = G_x / \omega$

Формула для момента двигателя получается в соответствии с (5)

*/\*вывод формулы момента двигателя\*/*  
 $M_{d'v} = \text{factor}(Z_p * (\text{transpose}(I_x) \cdot G_{xx} \cdot I_x))$

В результате получаем выражение:

$$M_{d'} = \frac{(\sqrt{3} I_{br} I_c - 3 I_{ar} I_c + \sqrt{3} I_b I_{br} - 2\sqrt{3} I_a I_{br} + 3 I_{ar} I_b) L_{mf} Z_p}{2\sqrt{3}} \quad (11)$$

В формуле (11) вектор тока  $I_x$  есть colon $[I_a I_b I_c I_{ar} I_{br}]$ , где  $I_a, I_b, I_c$  – токи в фазах **a, b, c** статора,  $I_{ar}, I_{br}$  – токи в фазах **α** и **β** ротора.

Выражение для вектора э.д.с. двигателя выводится в соответствии с (5):

*/\*вывод вектора э.д.с.\*/*

$$E = E_x : Z_p * G_x \cdot I_x$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega I_{br} L_r Z_p - \frac{\sqrt{3} \omega I_c L_{mf} Z_p}{2} + \frac{\sqrt{3} \omega I_b L_{mf} Z_p}{2} \\ -\omega I_{ar} L_r Z_p + \frac{3 \omega I_c L_{mf} Z_p}{2} + \frac{3 \omega I_b L_{mf} Z_p}{2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Полученных формул (7), (9), (11), (12) достаточно для построения Spice-модели асинхронного двигателя. Из библиотечного набора Spice-элементов могут быть использованы линейные **R, L**-ветви, взаимные индуктивности, управляемые источники тока и напряжения.

Для реализации модели была использована Spice-программа LTspice в составе пакета SwCADIII фирмы Linear Technology (freeware, <http://www.linear.com/software>) [3]. Кроме программы моделирования в пакет входит графический редактор схем и графический постпроцессор для отображения графиков с результатами расчета. Оба графических редактора связаны друг с другом (указав мышкой тот или иной участок схемы, автоматически отображается график тока, напряжения или мощности на этом участке).

На рис.1 приведена схема замещения и изображение асинхронного двигателя, подготовленные в пакете SwCADIII.

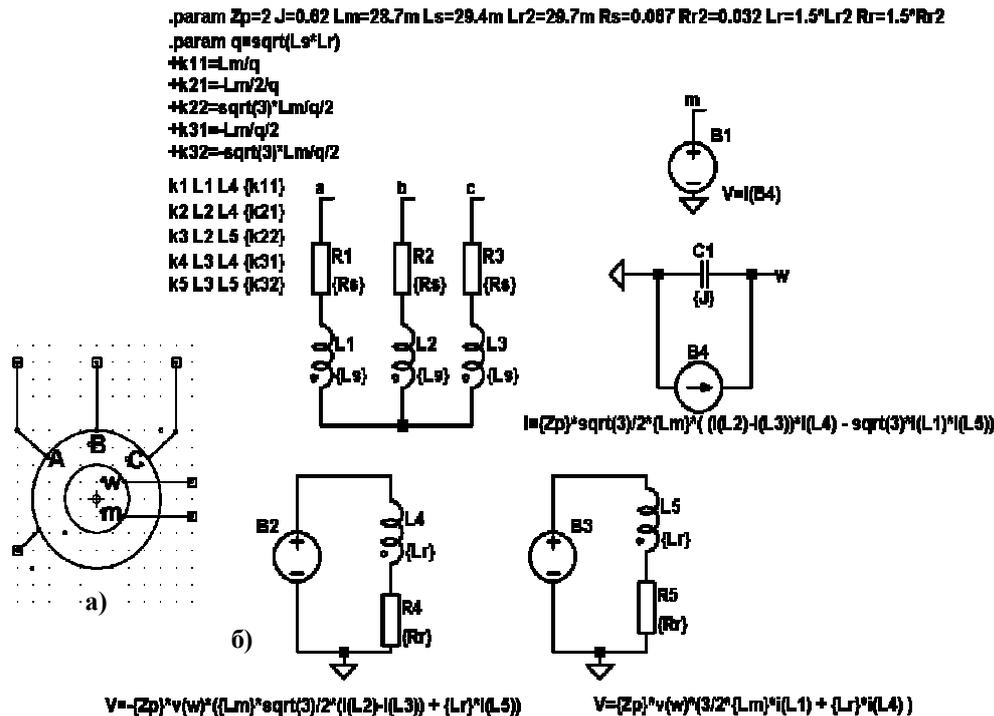


Рис.1. Модель асинхронного короткозамкнутого двигателя в системе SwCADIII - LTspice.

а) условное графическое изображение, б) схема замещения.

На рис.1 в строках Spice-директивы `.param` заданы значения параметров двигателя. Взаимные индуктивности задаются коэффициентами связи обмоток и вычисляются в соответствии с выражениями, приведенными в матрице индуктивностей (9). Управляемые источники напряжения **B2** и **B3** моделируют э.д.с. роторных обмоток. Автоматически выведенные выражения, приведенные в (12), были дополнительно откорректированы с учетом того, что при соединении обмоток в звезду  $I_a = -I_b - I_c$ . Управляемый источник **B4** моделирует момент, развиваемый двигателем. Формула расчета тока этого источника соответствует (11), с учетом некоторых упрощений. Знак выражений в источниках **B2-B4** отражает направление положительного тока в соответствующих индуктивностях. Емкость **C1** моделирует механический момент инерции, напряжение на емкости (на узле **w**) численно равно механической скорости вращения двигателя. Управляемый источник напряжения **B1** введен для того, что бы на узел **m** вывести значения момента двигателя в виде потенциала. Таким образом, кроме трехфазных выводов, двигатель имеет два дополнительных: один для отображения информации о моменте, другой для отображения информации о скорости двигателя и одновременно для подсоединения электрических элементов, моделирующих механическую часть привода. Кроме того, для получения осциллограмм фазного напряжения, еще один вывод соединяется с нейтралью статорных обмоток.

На рис.2 изображен пример схемы и осциллограммы момента и скорости (в эл.рад.) асинхронного двигателя при его прямом пуске в режиме идеального холостого хода. Схема и графики построены в графических редакторах пакета SwCAD.

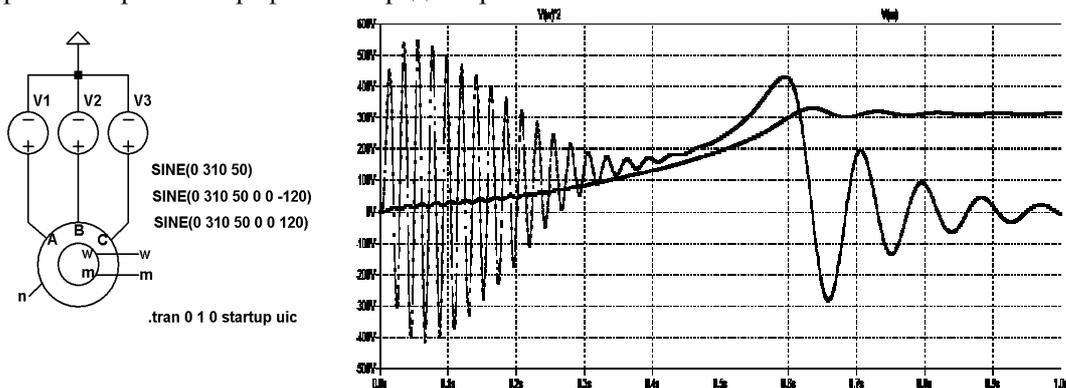


Рис.2. Пример схемы для исследований прямого пуска асинхронного двигателя.

Таким образом, приведенные тензорные соотношения могут быть применены в математическом пакете Maxima для автоматизированного получения Spice-моделей электрических машин. Исследования электроприводов могут быть выполнены в пакете SwCAD, в состав которого входит программа моделирования LTspice. Пакеты Maxima и SwCAD свободно распространяются, являются полнофункциональными и не имеют характерных для "студенческих" версий коммерческих пакетов ограничений на размер задач (таких, например, как в пакете MicroCAP). Поэтому результаты, полученные в профессиональной инженерной работе, могут быть непосредственно использованы в учебных лабораториях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крон Г. Применение тензорного анализа в электротехнике. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1955 г.-275с.
2. Математический пакет символьной математики Maxima. / Интернет-ресурс <http://maxima.sourceforge.net>.
3. Описание системы моделирования SwitcherCAD-LTspice. / Интернет-ресурс - <http://LTspice.linear-tech.com/software/scad3.pdf>.

*А.И.ХИТРОВ*

### **ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВПО В СОКРАЩЕННЫЕ СРОКИ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ 140604**

Проводится анализ проблем при обучении студентов по сокращенным программам обучения специальности 140604.

Электромеханический факультет (ЭлМФ) Псковского государственного политехнического института (ППИ) начал работу со студентами очной формы обучения по сокращенным программам относительно недавно, в 2004 году. 2006 год стал стартовым для студентов заочной формы обучения, которые приступили к обучению по сокращенным (срок обучения 4 года) программам высшего профессионального образования (ВПО).

В июне 2007 года состоялся первый выпуск инженеров, подготовка которых велась по очной сокращенной форме обучения на основе приема выпускников колледжей (техникумов) по родственным специальностям. Из 27 принятых к обучению студентов до выполнения дипломного проекта было допущено 15 студентов.

Возникает вопрос: « 55% студентов, получивших диплом специалиста, много это или мало»? В чем причина такого показателя? Низкий он или высокий?

Набор на специальность 140604 был осуществлен на основании Порядка приема в государственные образовательные учреждения ВПО Российской Федерации, утвержденного приказом Министерства образования Российской Федерации № 50 от 14.01.2003, и приказа Министерства образования Российской Федерации № 1725 от 13.05.2002 «Об утверждении Условий освоения основных образовательных программ ВПО в сокращенные сроки».

К обучению были допущены лица, имеющие среднее профессиональное образование (СПО) соответствующего профиля.

Ряд дисциплин учебного плана были перезачтены (переаттестованы) на основании документов о предыдущем СПО. В основном это были дисциплины циклов «Общие гуманитарные и социально-экономические дисциплины», «Общепрофессиональные дисциплины» при условии, что ранее были изучены аналогичные (по названию и/или содержанию) дисциплины.

Сокращение сроков освоения общеобразовательных программ ВПО осуществлялось на основе имеющихся знаний, умений и навыков студентов, полученных ими на предыдущем этапе профессионального образования.

Успех обучения во многом зависит от закладываемой базы профессионального обучения в среднем профессиональном звене. Кто же является нашими абитуриентами? Это выпускники Политехнического колледжа ППИ, Индустриального техникума г. Пскова, которые обучаются по специальности 220301.51 «Автоматизация технологических процессов и производств», а