

УДК 62-768.3

В.М.Завьялов, И.Ю.Ложкин

ВЛИЯНИЕ ТИПА КАБЕЛЯ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ И ЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

В настоящее время в горной промышленности нашли широкое применение электроприводы переменного тока с преобразователями частоты (ПЧ). Силовые ключи этих преобразователей работают с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) на частотах порядка 3 – 16 кГц в зависимости от типа и мощности преобразователя. При коммутации ключей в кабеле возникают мощные кондуктивные импульсы, спектр частот которых составляет килогерцы и даже мегагерцы. На угольных предприятиях для подключения оборудования, в том числе и для частотных преобразователей, широко применяются кабели для бурошарового инструмента, которые имеют графитополимерный экран. Подключение ПЧ такими кабелями ухудшает электромагнитную совместимость (ЭМС) с другим оборудованием, способствует возникновению синфазных токов в жиле заземления и создает электромагнитное излучение высокой частоты от кабеля.

На горных предприятиях применяются сети с изолированной нейтралью, в которых для обеспечения безопасности устанавливаются устройства контроля сопротивления изоляции. Возникающие синфазные токи высокой частоты могут оказать негативное влияние на работу устройств защиты. Эти токи также протекают и в электродвигателях, наводясь в роторе и замыкаясь через подшипники. Это приводит к искрению в подшипниках, и как следствие к уменьшению срока их службы. Проблема ЭМС оборудования с частотными преобразователями на горных предприятиях в настоящее время уделяется мало внимания, ввиду отсутствия эффективных решений.

Анализ процессов в таких системах можно осуществлять используя модель сети с изолиро-

ванной нейтралью, включающую в себя частотный преобразователь, кабельную линию и асинхронный двигатель. В этой модели будем использовать идеализированный ПЧ, у которого на входе имеется трехфазный выпрямитель, емкостная связь между шинами постоянного тока и корпусом, силовые ключи на выходе формируют синусоидальное напряжение частотой 50 Гц с помощью ШИМ. Кабельная линия с распределенными параметрами представляется в виде некоторого количества участков кабеля с сосредоточенными параметрами. Каждый участок имеет свое сопротивление изоляции, сопротивление токопроводящей и заземляющей жилы, емкости между жилами, индуктивность токопроводящей жилы. Схема частичных емкостей трехжильного кабеля в металлической оболочке представлена на рис.1 [1]. Емкостью C_1 показана емкостная связь между токопроводящими жилами, емкостью C_0 – емкостная связь жил с экраном кабеля.

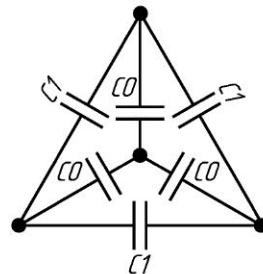


Рис. 1. Схема частичных емкостей экранированного трехжильного кабеля

В горном оборудовании на трансформаторных подстанциях со стороны низкого напряжения устанавливается устройство непрерывного контроля изоляции. На схеме замещения представим его в

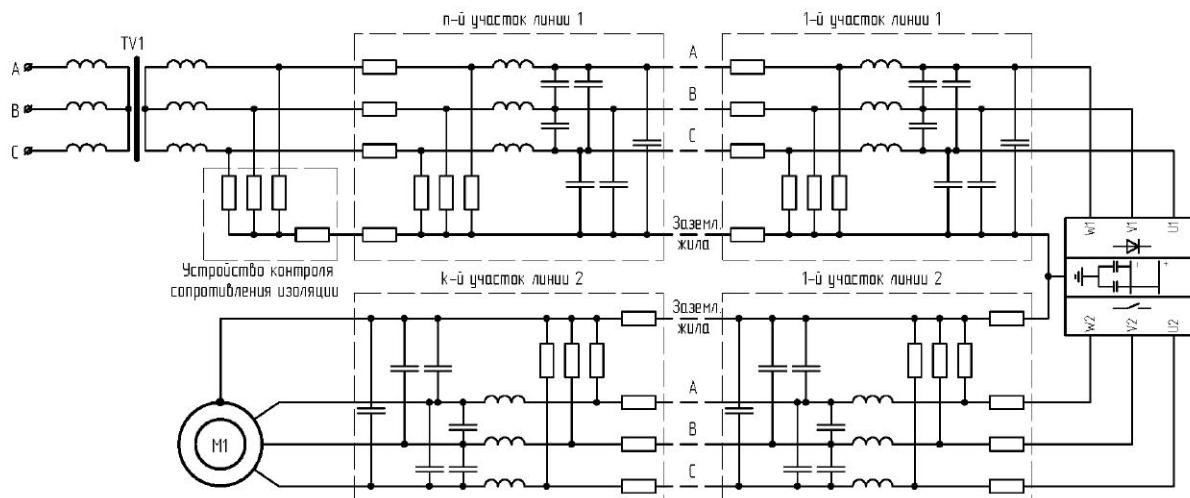


Рис. 2. Схема замещения участка шахтной электрической сети

Параметры двигателя ВРП160S6

P , кВт	n , об/мин	$I_{\text{ном}}$, А	КПД, %	$\cos\phi$	$S_{\text{ном}}$, %	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{мин}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}}$
11	1000	13,2	88	0,83	2,4	6,2	2,1	1,3	2,6
Параметры схемы замещения									
r_l , Ом	r_2' , Ом	r_m , Ом	$x_{l\sigma}$, Ом	$x'_{2\sigma}$, Ом	x_m , Ом				
0,303	0,946	208	3,94	3,94	64,67				

виде трех резисторов включенных по схеме «звезда», общая точка которой через резистор подключается к заземляющей жиле. В результате получена схема замещения, которая представлена на рис. 2.

При моделировании использовались параметры кабеля для бурильного инструмента КОГВЭШ 3х4+1х4+1х2,5. Вся линия разбита на участки длиной 1 метр. Длина кабеля между трансформатором TV1 и ПЧ примем 5 метров, между ПЧ и

двигателем – 20 метров. Данный кабель имеет следующие справочные параметры: активное сопротивление силовых жил и жилы заземления не более $5,63 \cdot 10^{-3}$ Ом/м; сопротивление изоляции не менее 5000 МОм/м. В справочниках индуктивность и емкость силовых жил данного кабеля не приводится.

Жилы этого кабеля имеют индивидуальный экран, поэтому в схеме замещения будут только емкости $C0$ (рис.1), т.е. кабель представится тремя

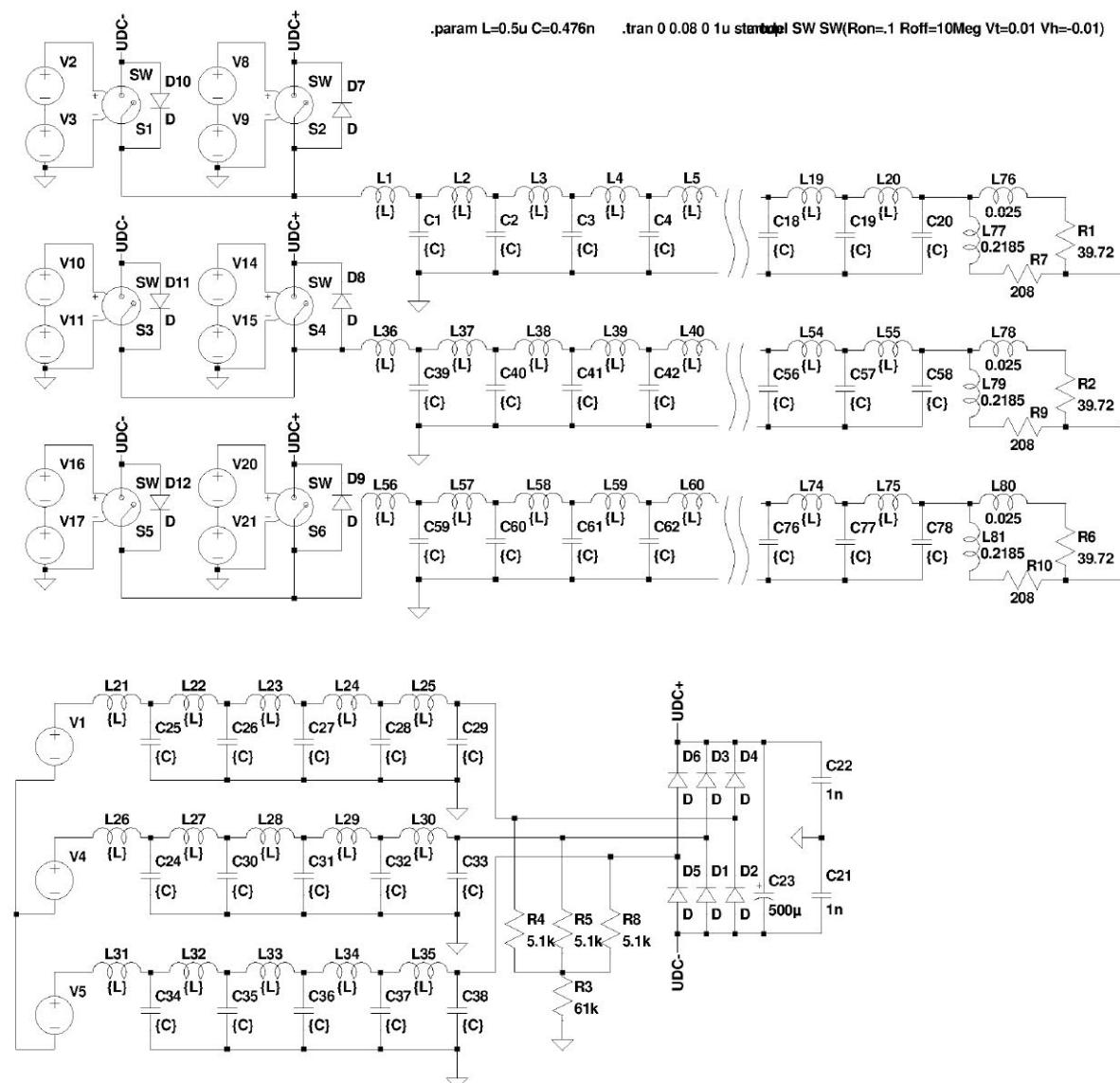


Рис. 3. Модель в LTspice

цилиндрическими конденсаторами. Цилиндрическая поверхность экрана представляет собой равнопотенциальную поверхность. Напряженность электрического поля в любой точке этой поверхности с радиусом r можно определить следующим способом, описанным в [1]. Найдем поток вектора D сквозь экран

$$\int B = Dds = D2\pi rl = \epsilon E 2\pi rl = Q \quad (1)$$

Из формулы (1) получим напряженность поля:

$$E = \frac{Q}{2\pi rl\epsilon_0\epsilon_r}, \quad (2)$$

где D – электрическое смещение; E – напряженность электрического поля; Q – линейный заряд; r и l – соответственно радиус и длина жилы; ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ_r – диэлектрическая проницаемость изоляционного материала.

Напряжение между токопроводящей жилой и экраном

$$U = \int_{r_1}^{r_2} Edr = \frac{Q}{2\pi l\epsilon_0\epsilon_r} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{Q}{2\pi l\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (3)$$

где r_1 – радиус неизолированной жилы; r_2 – радиус внутренней поверхности экрана.

Зная напряжение между токопроводящей жилой и экраном (3), определяем емкость жилы кабеля:

$$CO = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi l\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (4)$$

Подставляем в выражение (4) значения: $l=1m$; $\epsilon_0=8,854 \times 10^{-12} \Phi/m$; для ПВХ изоляции $\epsilon_r=5$; радиус гибкой жилы 4 мм^2 из скрученных проволок $r_1 \approx 1,5 \text{ мм}$; толщина изоляции $r_1 = 1,2 \text{ мм}$. В ре-

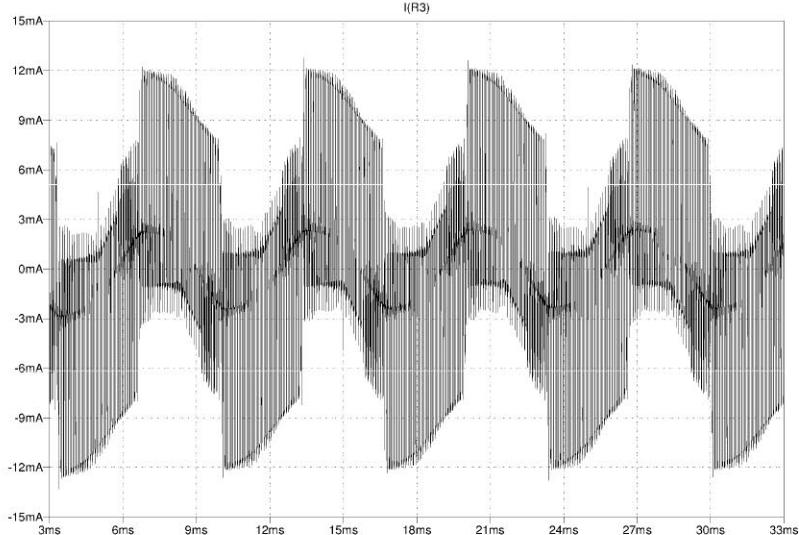


Рис. 4. Ток через реле утечки при исправной изоляции с кабелем КОВГЭШ

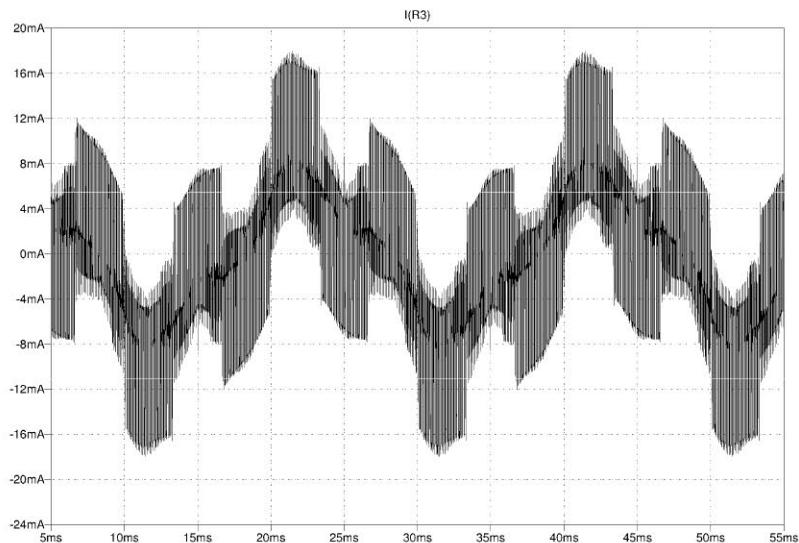


Рис. 5. Ток через реле утечки при однофазной утечке 30кОм с кабелем КОВГЭШ

зультате получаем емкость $C_O=0,476 \text{ нФ/м}$.

Индуктивность жил кабеля можно примерно найти как индуктивность длинного прямого проводника, которая выражается приближенной формулой:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} l \left(\mu_e \ln \frac{l}{r} + \frac{1}{4} \mu_i \right), \quad (5)$$

где μ_0 – магнитная постоянная ($1,256 \times 10^{-6} \text{ Гн/м}$); μ_e – относительная магнитная проницаемость внешней среды (для ПВХ ≈ 1); μ_i – относительная магнитная проницаемость материала проводника (для меди 0,999994); l – длина проводника. Подставляя данные в выражение (5) получаем, что $L \approx 0,4 \text{ мкГн/м}$.

На данном этапе работы, токи, замыкающиеся через подшипники двигателя, не оцениваются, поэтому двигатель представлен Г-образной схем-

мой замещения. Для моделирования выбран двигатель рудничный взрывозащищенный ВРП160S6. Расчет параметров схемы замещения производился для установившегося номинального режима, при частоте питающего напряжения 50 Гц, по методике, описанной в [4]. Каталожные данные и полученные параметры схемы замещения двигателя приведены в таблице.

В модели защитное устройство работает на токах нулевой последовательности, т.е. состоит из «звезды» резисторов, средняя точка которой подключается через сопротивление к заземлению. Моделирование проводилось в среде LTspice. Полученная модель для кабеля КОВГЭШ показана на рис. 3.

В модели вместо питающего трансформатора используются источники переменного напряжения амплитудой $660\sqrt{2}$ вольт. Из-за небольшой длины кабеля пренебрегаем активным сопротив-

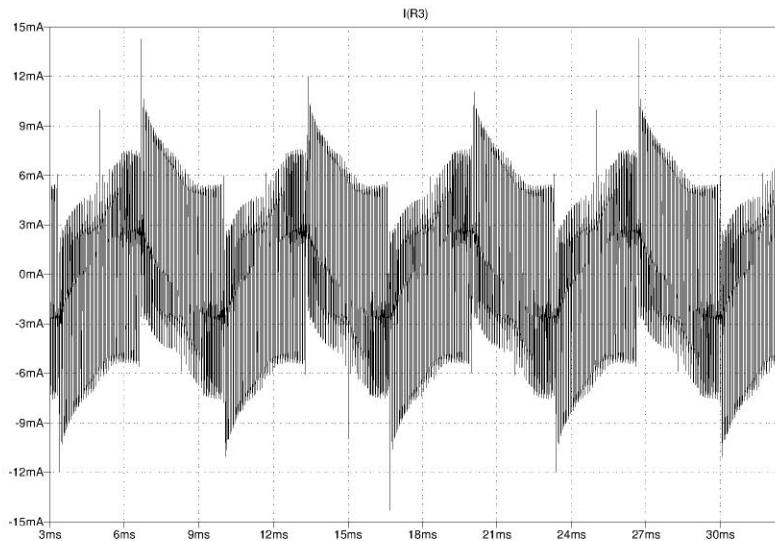


Рис.6. Ток через реле утечки при исправной изоляции с кабелем Topflex-EMV-UV-2YSLCYK-J

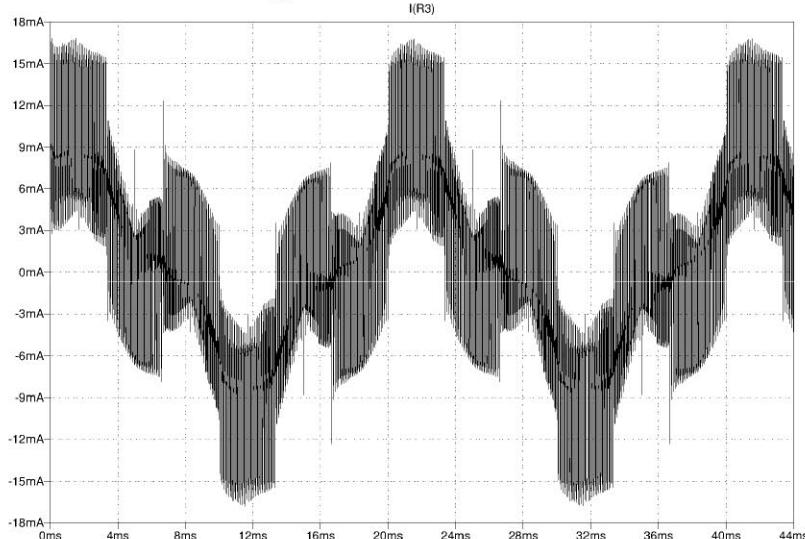


Рис.7. Ток через реле утечки при однофазной утечке 30кОм с кабелем Topflex-EMV-UV-2YSLCYK-J

лением жил и сопротивлением изоляции. Все конденсаторы подключены к общей точке, которая является заземляющей жилой. Инвертор напряжения состоит из шести ключей, которые формируют трехфазное напряжение по скалярному закону управления.

Задачей моделирования является определить ток, который протекает через устройство непрерывного контроля изоляции (реле утечки), при исправной изоляции, и при поврежденной изоляции. Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 видно, что даже при исправной изоляции через реле утечки протекает ток, величина среднеквадратичного значения которого составляет 6,4 мА. Также видно, что этот ток имеет высокочастотную составляющую и низкочастотную с периодом примерно 6,5 мс, который соответствует частоте 150 Гц. Это говорит о наличии синфазных токов в заземляющем проводнике.

На рис. 5 представлен график тока, при однофазной утечке 30 кОм. Величина среднеквадратичного тока составляет 7,82 мА, т.е. произошло незначительное увеличение тока по сравнению с исправной изоляцией. Но при этом видно, что существенно изменилась форма тока, добавилась составляющая с частотой 50 Гц.

Полученные результаты моделирования подтверждаются экспериментальными исследованиями, которые были доложены и опубликованы в [3]. Сравнивая кривую тока на рис. 4 и 5, можно сделать вывод, что реле утечки, работающие на токах нулевой последовательности, не смогут во время обнаружить даже однофазную утечку.

Производители ПЧ рекомендуют использовать симметричные экранированные кабели с металлическим экраном. На зарубежном рынке существу-

ет множество кабелей разработанных специально для работы с ПЧ. Выберем один из таких кабелей, например, Topflex-EMV-UV-2YSLCYK-J 4G4. В каталожных данных этого кабеля указаны емкости: $C0=150$ пФ/м, $C1=90$ пФ/м. (по рис. 1). Т.к. форма, сечение жил и материал изоляции кабеля аналогичны кабелю КОВГЭШ, то примем индуктивность жил равной также 0,4 мГ/м. Результат моделирования линии с кабелем Topflex-EMV-UV-2YSLCYK-J 4G4 представлен на рис. 6 и 7.

На рис. 6 видно, что при исправной изоляции через реле утечки также протекает ток, действующее значение которого 4,54 мА. Это примерно на 29% меньше тока при применении кабеля КОВГЭШ. На рис. 7 показан ток в реле утечки при однофазной утечке 30 кОм. Величина среднеквадратичного тока при этом равна 7,42 мА, что схоже с результатом при применении кабеля КОВГЭШ.

Моделирование аналогичной схемы без преобразователя частоты показало, что при исправной изоляции ток через реле утечки практически отсутствует, а при однофазной утечке 30 кОм протекает ток с действующим значением 7 мА, что схоже с результатами в сети с ПЧ.

Из результатов моделирования видно, что одной из проблем является ток утечки, протекающий при исправной изоляции, который может привести к ложным срабатываниям реле утечки.

Чтобы уменьшить этот ток необходимо применять специализированные симметричные кабели с общим металлическим экраном, по возможности уменьшать длину кабеля. Это также позволит уменьшить высокочастотные излучения.

Чтобы исключить ложные срабатывания необходимо применять реле утечки, работающие на оперативных токах определенной формы и частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цапенко Е.Ф. Шахтные кабели и электробезопасность сетей.–3-е изд., перераб. и доп./ Цапенко Е.Ф., Сычев Л.И., Кулешов П.Н. – М.: Недра, 1988.–213с.
2. Дзюбан В.С. Справочник энергетика угольной шахты / В.С. Дзюбан, Я.С. Риман, А.К. Маслий. – М.: Недра, 1983. – 542 с.
3. Завьялов В.М., Ложкин И.Ю. Исследование влияния преобразователя частоты на токи утечки в кабельных сетях с изолированной нейтралью. Труды IV Всероссийской научно-практической конф. "Автоматизированный электропривод и промышленная электроника" АЭПЭ-2010 (Новокузнецк, 12 – 15 октября 2010 г.) – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010.
4. Ильина А.Г., Лукичев Д.В., Усольцев А.А. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным / А.А. Усольцев, Д.В. Лукичев, // Изв. Вузов. Приборостроение, 2008. № 10. с. 35-41.

□Авторы статьи:

Завьялов
Валерий Михайлович,
д.т.н., доцент, директор института
энергетики КузГТУ.
Email: <mailto:zaval@hotbox.ru>

Ложкин
Иван Юрьевич,
аспирант каф. электропривода и
автоматизации КузГТУ.
Тел.