

## Дискуссии

### К расчету интегральных характеристик тока и момента тягового электропривода с контактной сетью

(Статья Малинина Л.И., Неймана В.Ю., «Электричество», 2012, № 10)

ЛИТОВЧЕНКО В.В.

Заголовок обсуждаемой статьи «К расчету интегральных характеристик тока и момента тягового электропривода с контактной сетью» содержит термины, не встречающиеся в специальной технической литературе, посвященной тяговому электрическому подвижному составу. Авторы, по-видимому, имели в виду «... характеристики ... с учетом параметров контактной сети».

Во введении авторы указывают «... задача энергосбережения на электрическом транспорте требует повышения точности математических моделей электрооборудования», а в то же время в статье модель тягового электропривода огрубляется. Тяговый привод современного электрического подвижного состава гораздо сложнее и разнообразнее того примера, который авторы рассматривают в представленной статье, а именно, одного «тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (ДПВ)». На тяговом электрическом подвижном составе, как правило, имеется несколько тяговых двигателей, и регулирование режимов их работы при питании от контактной сети постоянного тока осуществляется несколькими способами: изменением схемы соединения двигателей, изменением сопротивления в цепи тяговых двигателей и шунтированием обмоток возбуждения тяговых двигателей резистором.

Исходными для расчета электромеханических характеристик тягового привода являются напряжение на токоприемнике, а не напряжение тяговой подстанции, как считают авторы. Тем более, что основной вид нагружения — наличие нескольких транспортных единиц в пределах фидерной зоны «секции контактной сети». Для тягового электропривода характерными являются режимы движения с постоянной силой тяги (момента) и меняющейся в зависимости от профиля пути скоростью.

Допущение, что тяговые двигатели постоянного тока последовательного возбуждения с насыщенной магнитной системой имеют постоянный магнитный поток ( $\Phi = \text{const}$ ), не зависящий от тока якоря, не соответствует действительности. Поэтому выражение для «мгновенного значения тока тяго-

вого привода» на стр. 54 справедливо для двигателя с независимым возбуждением.

Выражение (1) получено при использовании понятия постоянный ток, не изменяющийся во времени, а не «понятия действующего значения тока», как это указано на стр. 54.

Из материалов статьи не понятен «метод эквивалентирования переменного сопротивления контактной сети», в чем его суть и что этим методом можно определять.

Одной из целей работы авторы поставили «определение интегральных характеристик тока (действующего и среднеквадратичного значений)». По этому поводу следует указать, что ГОСТ Р 52002—2003 дает следующее определение действующего значения (периодического электрического) тока: среднеквадратическое значение периодического электрического тока за период. В сноске поясняется, что аналогично определяют действующие значения периодических электрического напряжения, электродвижущей силы, магнитного потока и т.д. Таким образом, ГОСТ дает определение и указывает способ вычисления действующего значения тока.

Аналогичные определения приводятся и в учебниках по электротехнике. Так, в книге Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей (Изд. 4-е, перераб. — М.: Энергия, 1975) на стр. 110 указано:

За один период переменного тока в проводнике с сопротивлением  $r$  выделяется тепловая энергия:

$$\int_0^T \dot{r} i^2 dt = rT \frac{1}{T} \int_0^T \dot{i}^2 dt = rI^2 T.$$

Отсюда следует, что действующий ток численно равен такому постоянному току, который за один период выделяет в том же сопротивлении такое же количество тепла, как и ток переменный.

В учебнике Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи (7-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1978) на стр. 59 отмечается:

Широко применяют понятие действующего значения синусоидально изменяющейся величины (его называют также эффективным или среднеквадратичным). Действующее значение тока

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \dot{i}^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \dot{i}_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m. \quad (3.5)$$

Следовательно, действующее значение синусоидального тока равно 0,707 амплитудного. Аналогично имеем

$$E = E_m / \sqrt{2} \text{ и } U = U_m / \sqrt{2}.$$

Можно сопоставить тепловое действие синусоидального тока с тепловым действием постоянного тока, текущего в то же время по тому же сопротивлению.

Количество теплоты, выделенное за один период синусоидальным током,

$$\int_0^T \dot{R} i^2 dt = R I_m^2 \frac{T}{2}.$$

Выделенная за то же время постоянным током теплота равна  $R I_{\text{пост}}^2 T$ . Приравняем их:

$$R I_m^2 \frac{T}{2} = R I_{\text{пост}}^2 T \text{ или } I_{\text{пост}} = I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Таким образом, действующее значение синусоидального тока  $I$  численно равно значению такого постоянного тока, который за время, равное периоду синусоидального тока, выделяет такое же количество теплоты, что и синусоидальный ток.

Авторы используют термины и определения для действующего и среднеквадратичного значений тока, которые не встречаются в технической и учебной литературе. Основное отличие в терминах авторов заключается в том, что ГОСТ и учебники определяют действующее значение тока по тепловому действию тока за один период и на одном и том же конкретном сопротивлении, а авторы — за некоторое произвольное «время движения» и на не

менее произвольно меняющемся сопротивлении. Поэтому термины «действующее», «среднеквадратичное значение тока», которые авторы используют в статье, фактически не являются таковыми. Например, в выражении (3) авторы считают ток  $I$  действующим значением переменного тока  $i(t)$ , а несколько ранее при определении эквивалентного сопротивления этот же переменный ток считают постоянным. Более того, предложив свои определения действующего и среднеквадратичного значений тока, авторы пришли к весьма противоречивым выводам:

«... для стационарного режима возможно использование среднеквадратичного значения тока в качестве эффективного», а

«Из приведенных зависимостей... видна явная недопустимость использования среднеквадратичного значения тока в качестве действующего».

Читатель в таком случае остается в полном неведении, как результаты статьи согласуются с ГОСТ. Как можно использовать результаты статьи для анализа режимов работы тягового привода?

Материалы статьи, посвященные определению мгновенного и среднего значений момента тягового двигателя, также вызывают много вопросов. Обычно механические характеристики тягового привода (зависимости силы тяги от скорости) используются для расчета кривых движения поезда. При этом в уравнениях движения фигурируют силы, действующие на поезд в данный момент времени. Поэтому совершенно непонятно применение «среднего значения момента ненасыщенного ДПВ» за весь интервал движения. Что с ним делать и куда его применить?

Вывод 4 статьи гласит: «Расчет моментов тягового двигателя постоянного тока необходимо выполнять с учетом собственного электромагнитного поля якоря, что позволяет учитывать динамическую реакцию якоря и влияние параметров контактной сети». Следует заметить, что в тяговых двигателях собственное магнитное поле якоря уже давно учитывают в виде реакции якоря, однако в статье об этом ничего не сказано.

## Ответ авторов

Авторы обсуждаемой статьи, являясь экспертами (членами совета по защите докторских диссертаций) в области электротехнических комплексов, сталкиваются с одной и той же физической ошибкой при рассмотрении транспортных комплексов, содержащих контактную сеть. При анализе этих комплексов на уровне схем с сосредоточенными

параметрами контактная сеть в известных работах эквивалентруется средним значением участка секции контактной сети, т.е. игнорируется тот факт, что сопротивление участка секции контактной сети является функцией времени. Необходимость устранения этой ошибки и обусловила появление указанной статьи.

На первой странице автор отклика, упрекая авторов статьи в простоте математической модели тягового привода, игнорирует основную направленность статьи, связанную с наличием в цепи переменного во времени сопротивления. А именно выбор математической модели во многом зависит от цели исследования. Достоинством исследования всегда является достижение цели простыми средствами. И только после получения достоверных математических моделей элементов возможен комплексный подход по созданию математической модели реального устройства.

На стр. 70–71 отклика цитируется определение действующего значения тока по ГОСТ Р 52002–2003 и аналогичные определения из учебников по электротехнике, что нами не комментируется.

Далее автор отклика сообщает, что термины и определения, которые используют авторы, «не встречаются в технической и учебной литературе». Здесь следует вспомнить, что современный термин «действующее значение тока» имеет ранее применявшиеся синонимы: греющее, эквивалентное по условию нагрева, эффективное, среднеквадратичное. А затем обратиться к фундаментальной литературе:

1. **Андреев В.П., Сабинин Ю.А.** Основы электропривода. — М.;Л.: Госэнергоиздат, 1963, гл. пятая «Выбор мощности электродвигателя».

2. **Справочник** по автоматизированному электроприводу/Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. — М.: Энергоатомиздат, 1983.

3. **Справочник** по электрическим машинам, т. 1/Под общ. Ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. — М.: Энергоатомиздат, 1988.

Кстати, здесь же, например, в первом источнике на стр. 459 можно ознакомиться с тем, как оп-

ределяется среднеквадратичное значение тока за цикл через среднеквадратичные значения на отдельных участках графика. Разумеется, что в технической литературе вопрос рассматривается при условии постоянства активных сопротивлений. Как распространить понятие «действующего значения» на случай переменного во времени сопротивления, не изменяя его физической сути, рассмотрено в нашей статье. Здесь же показано, что в данном случае термины «действующее значение» и «среднеквадратичное значение» перестают быть синонимами.

Что касается вопроса согласования результатов статьи с ГОСТ Р 52002–2003, то данный ГОСТ, как любой стандарт, может быть подвергнут корректировке.

У автора отклика по поводу материалов статьи, посвященных определению моментов тягового двигателя, основной вопрос связан с их применением. Ответ также содержится в классической теории электропривода. Однако при любом критерии оценки энергетических показателей необходимо знание токов и моментов, их средних и действующих значений. Представляется, что при решении задачи энергосбережения предпочтительным является прямой критерий энергоэффективности в виде энергетических потерь, выделяющихся в приводах при отработке одинаковой диаграммы нагрузочного момента. Разумеется, что это предмет самостоятельного исследования, базой которого является рассматриваемая статья. Пример подобного исследования без учета контактной сети приведен в книге Каган В.Г., Лебедев Г.В., Малинин Л.И. Полупроводниковые системы с двигателями последовательного возбуждения. — М.: Энергия, 1971.

*Малинин Л.И., Нейман В.Ю.*

\* \* \*

### Вниманию читателей!

В опубликованной в № 9/12 статье Г.Н. Цицикяна «Полная мощность трехфазной системы и стандарт IEEE ТМ – 2010», к сожалению допущены досадные опечатки (в основном в формулах — в обозначении физических величин).

Приносим автору и читателям искренние извинения и сообщаем, что по просьбе заинтересованных читателей статья Г.Н. Цицикяна с внесенными исправлениями может быть выслана на их почтовый или электронный адрес.