

**УДК 621.313**

**А. В. Дорохов,**  
канд. техн. наук,  
Харьковский  
национальный  
университет  
городского хозяйства  
им. А.Н. Бекетов

*С использованием ранее разработанной методики расчета переходных ударных токов и моментов при подключении асинхронных генераторов к сети проведен численный эксперимент и освещена зависимость характера переходных процессов и амплитудных величин токов и моментов от величины демпфирующего активного сопротивления введенного в цепь статора. Даны рекомендации по формированию оптимального алгоритма включения. Описаны явления сопутствующие переходному процессу.*

## **ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ВЕТРОЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ ИХ К СЕТИ ЧЕРЕЗ ДЕМПФИРУЮЩЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ЕГО ШУНТИРОВАНИЕМ**

**Введение.** Подключение асинхронного генератора ветроэлектроагрегата к сети осуществляется после того как ветротурбина раскрутит его ротор до синхронной скорости. Возникающий при этом переходной процесс с одной стороны обусловлен нарастанием тока в подключаемой к сети индуктивности, а с другой – вращением ротора как во вращающихся так и в, практически неподвижных, апериодических полях. Вращающееся поле в статоре наводит ЭДС частоты сети. Составляющие поля, ротора обусловленные апериодическими токами наводят в статоре затухающую ЭДС частоты сети, а в самом роторе апериодические составляющие ЭДС. Аналогичная ситуация имеет место с полями статора, обусловленными апериодическими составляющими токов статора, по отношению к, вращающемуся с синхронной скоростью, ротору. Взаимодействие указанных составляющих полей приводит к появлению переходных ударных токов и знакопеременных моментов во много раз превосходящих номинальные.

На ветроэлектростанции в Донузлаве на лицензионных ветроэлектроагрегатах USW56-100 американской фирмы U.S. WINDPOWER, в момент включения генератора, за счет ударных токов и моментов, имели место поломки лопастей ветротурбины и несанкционированные срабатывания защиты, исключающие возможность запуска ветроэлектроагрегата.

Для исключения подобных явлений используются различные технические решения.

**Устройство мягкого пуска** (soft start) [6], представляющее собой включенные последовательно с каждой фазой генератора встречно параллельно соединенные тиристоры. Устройство позволяет плавно увеличивать напряжение на зажимах генератора и соответственно плавно наращивать его ток и момент. Стоимость этих устройств достаточно велика и диапазон рабочих токов не охватывает токи мощных ветроэлектроагрегатов.

**Устройство для одновременного подключения фаз генератора к сети** в моменты времени, исключающие возникновение апериодических составляющих тока в

обмотке статора [5]. Теория и математические модели происходящих при этом процессов рассмотрены в работах [1],[2]. Такое решение следует из того, что, как известно из курса ТОЭ, при подключении индуктивности к сети в момент когда переменное синусоидальное напряжение максимально имеет место сразу установившийся режим. При подключении же нелинейной индуктивности в момент времени когда напряжение в сети равно нулю ток через пол периода после включения может в десятки и сотни раз превышать значение тока в установившемся режиме. Кроме того, данным устройством может быть обеспечено плавное наращивание напряжения на зажимах генератора. Стоимость такого устройства несколько меньше стоимости устройства мягкого пуска, а диапазон рабочих токов также ограничен.

**Включение генератора через последовательно включенные с обмотками статора индуктивности** [4] обеспечивает любое требуемое снижение тока и момента, но сама катушка индуктивности чрезмерно материалоемка и дорогостояща.

**Включение генератора через последовательно включенные с обмотками статора активные сопротивления** (рис.1) [1] также обеспечивает любое требуемое снижение тока и момента, при этом стоимость сопротивления значительно меньше чем стоимость катушки индуктивности. Именно активное сопротивление применено на осваиваемом в Украине, установленном на Тарханкуте лицензионном ветроэлектроагрегате Т600-48, мощностью 600кВт бельгийской фирмы Turbowind. Сопротивление включено в цепь статора когда разомкнуты контакты К и исключено из цепи – когда они замкнуты. В зависимости от величины сопротивления R и времени его пребывания в включенном состоянии, после замыкания контактов К возникают всплески тока и момента генератора.

В связи с этим возникает задача выбора такой величины сопротивления R и момента замыкания контактов К при которых величины всплесков тока и момента не превышают допустимых значений. Методика расчета токов и моментов в переходном режиме при трехфазном подключении асинхронного генератора к сети с нулевыми начальными условиями изложена в [3]. Эта методика пригодна без изменений для расчета токов и моментов при подключении асинхронного генератора к сети с последовательно включенным в цепь статора активным сопротивлением. При этом значение активного сопротивления статора должно быть увеличено на величину добавочного сопротивления. Для расчета переходного процесса после шунтирования добавочного сопротивления необходимо в качестве начальных условий принять значения потокосцеплений статора и ротора в момент шунтирования, а значение активного сопротивления равным активному сопротивлению обмотки статора. Это все учтено в программе, составленной на MathCAD PLUS 7.0 PRO, и с ее использованием проведен численный эксперимент.

Кратности максимальных в переходном режиме токов при различных величинах сопротивлений, соединенных последовательно с обмоткой статора представлены на рис.2. При шунтировании добавочного сопротивления после первого периода кратность тока с увеличением сопротивления резко снижается, а затем увеличивается, доходя, практически, до значения, которое наблюдается при отсутствии добавочного сопротивления в цепи статора. Это обусловлено тем, что за время равное одному периоду апериодические составляющие токов не успевают затухнуть, а при шунтировании сопротивления возникают новые апериодические токи, которые суммируясь с предыдущими приводят к увеличению полного тока (рис.2 – штриховая линия). На начальном участке, где кратность добавочного сопротивления меньше или равна пяти, снижение апериодических составляющих тока с ростом добавочного сопротивления на первом этапе включения больше увеличения апериодических составляющих после шунтирования.

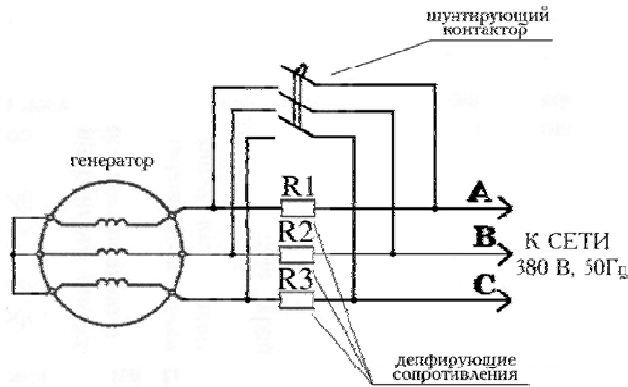


Рис. 1 – Включение генератора через последовательно включенные с обмотками статора активные сопротивления

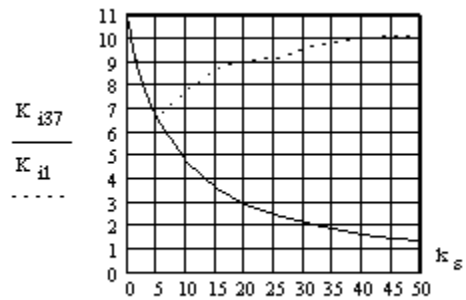


Рис. 2 – Зависимость максимальной в переходном режиме кратности тока от кратности добавочного сопротивления в цепи статора при отключении после 37 периода (сплошная линия) и после 1 периода (штриховая линия).

В связи с этим на начальном участке, при шунтировании добавочного сопротивления после первого периода, наблюдается снижение кратности максимального в переходном режиме тока. При шунтировании добавочного сопротивления после того как исчезли аperiodические составляющие тока на первом этапе включения, с ростом добавочного сопротивления имеет место монотонное снижение кратности максимального в переходном режиме тока.

Кратность добавочного сопротивления:

$$k_s = \frac{R_{доб}}{R_s}$$

где  $R_{доб}$  - величина добавочного сопротивления;

$R_s$  - величина активного сопротивления фазы обмотки статора.

Аналогичная ситуация имеет место по изменению кратности максимального в переходном процессе момента (рис.3). Весьма малое отличие (небольшие осцилляции момента) обусловленные не пропорциональным изменением векторов тока и магнитного потока и разности фаз между ними при шунтировании добавочного сопротивления после затухания аperiodических составляющих на первом этапе включения.

Следует также заметить, что как показывают расчеты, максимальная в переходном режиме кратность момента не зависит от начальной фазы напряжения в момент включения.

Сам характер изменений во времени тока и момента в значительной степени зависит от величины добавочного сопротивления в статорной цепи. На рис.4 представлена кривая изменения во времени модуля комплекса тока без добавочного сопротивления. Эта величина осциллирующая. Аналогичная зависимость при пятикратном демпфирующем сопротивлении рис. 5 без осцилляций до отключения добавочного сопротивления ( $t \leq 0.1сек$ ) и с осцилляциями после его отключения ( $t > 0.1сек$ ).

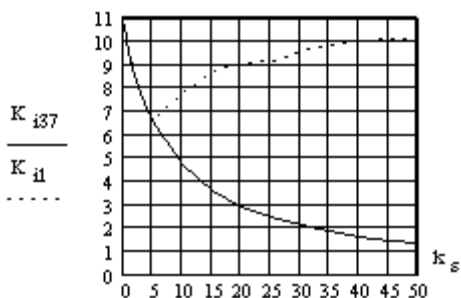


Рис. 3 – Зависимости максимальной в переходном режиме кратности момента от кратности добавочного сопротивления в цепи статора при отключении после 37 периода (сплошная линия) и после 1 периода (штриховая линия).

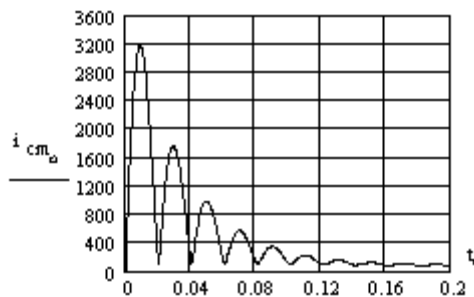


Рис. 4 – Изменение во времени модуля комплекса тока статора во вращающейся с синхронной скоростью комплексной системе координат при отсутствии добавочного сопротивления в статорной цепи.

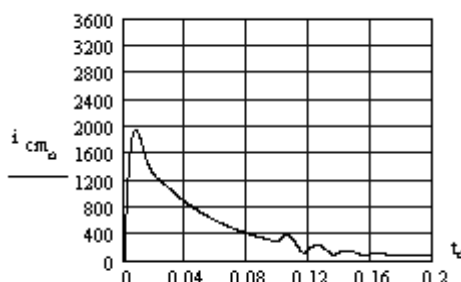


Рис.5 – Изменение во времени модуля комплекса тока статора во вращающейся с синхронной скоростью комплексной системе координат при пятикратном добавочном сопротивлении в статорной цепи.

Идентичная ситуация наблюдается в характере кривых изменения во времени момента генератора без демпфирующего сопротивления (рис. 6) и с демпфирующим сопротивлением (рис.7).

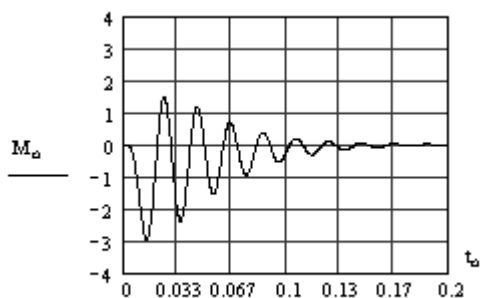


Рис. 6 – Изменение момента генератора в переходном режиме при отсутствии добавочного сопротивления в статорной цепи.

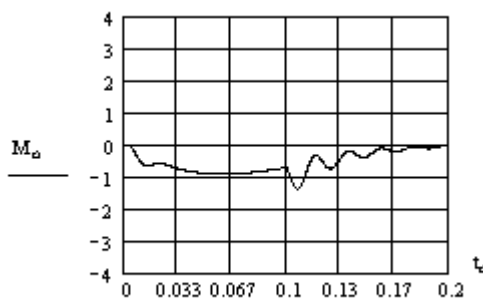


Рис. 7 – Изменение момента генератора в переходном режиме при пятикратном добавочном сопротивлении в статорной цепи.

**Заключение.** Шунтирование демпфирующего сопротивления необходимо производить только после затухания аperiodических составляющих токов, что исключает всплески токов и моментов, превышающие их максимальные значения при включенном демпфирующем сопротивлении. Время затухания аperiodических составляющих тока для различных асинхронных генераторов колеблется в пределах от 0,2 до 1,5 сек.

Максимальная в переходном режиме кратность момента не зависит от начальной фазы напряжения в сети при подключении асинхронного генератора.

С ростом величины демпфирующего сопротивления снижаются осцилляции модуля вращающегося комплекса тока и момента, а начиная с определенного значения дополнительного сопротивления, включенного последовательно с обмоткой статора, полностью исчезают. Это обстоятельство имеет большое значение так как знакопеременные моменты особо опасны для механической части ветроэлектроагрегатов.

Соответствующим выбором величины демпфирующего сопротивления можно обеспечить любые заданные величины максимальных в переходном режиме кратностей тока и момента.

### Литература

1. Дорохов А. В., Финкельштейн В. Б., Демпфирование ударных токов и моментов при подключении к сети асинхронных генераторов ветроэлектроагрегатов //Электротехника і Електромеханіка. – 2002. - №2. –С. 39-42.
2. Дорохов А. В., Финкельштейн В. Б., Смягчение электродинамических перегрузок при подключении к сети асинхронных генераторов ветроэлектроагрегатов //Электротехника і Електромеханіка. – 2003. - №2. – С. 24-27.
3. Дорохов А. В., Финкельштейн В. Б. Токи и моменты асинхронных генераторов ветроэлектроагрегатов в переходном режиме при подключении их к сети //Техн. електродинаміка. – 2003.-№2.-С. 52-54.
4. Копчак Б. Л., Шуфлат А. Р. Дослідження і вибір раціонального режиму підмикання асинхронного генератора вітроенергетичної установки до мережі // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Львів: -2000. №400. – С. 66 -70.
5. Устройство для ограничения ударных моментов при пуске двигателей переменного тока: А. с. № 221117 СССР, / В. А. Ладензон, М. П. Обуховский, Л. П. Петров (СССР). - Бюл., 1968, №21.
6. GE Power Control / Control and Automation Products. – General Catalogue. 1999. – Серия ASTAT Softstarter.

### ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ВІТРОЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ ПРИ ЇХ ПІДКЛЮЧЕННІ ДО МЕРЕЖИ ЗА ДОПОМОГОЮ ДЕМПФУЮЧОГО ОПОРУ З НАСТУПНИМ ЙОГО ШУНТУВАННЯМ

О. В. Дорохов

*З використанням раніш розробленої методики розрахунку перехідних ударних струмів та моментів при підключенні асинхронних генераторів до мережі, проведено чисельний експеримент та показана залежність характеру перехідних процесів амплітудних величин струмів та моментів від величини демпфуючого активного опору введеного в ланцюг статора. Запропоновані рекомендації з формування оптимального алгоритму включення. Описані явища супроводжуючі перехідний процес.*

### DYNAMIC DECKRIPNION WINDPOWERA UNIT INDAKTION GENERATOR AT THEIR CONNCTION TO THE NETWORK THROUGH DAMPING RESISTANCE WITH SUBSEQUENT SHUNTING

A. V. Dorokhov

*With the use of a previously developed method for calculating transient surge currents and moments when you connect to a network of asynchronous generators the numerical experiment and lighted dependence of the nature of transients and peak values of the currents and the moments of the value entered in the stator circuit, damping resistance. Recommendations are given for the formation of an optimal algorithm inclusion. Described phenomena accompanying the transition process.*