

В. М. РЯБЕНЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. НУК им. адм. Макарова, Николаев;
А. О. УШКАРЕНКО, канд. техн. наук, доц. НУК им. адм. Макарова, Николаев;
ЯЗИД ДЖАМАЛ ИСМАИЛ АЛЬ-ШАЙХ, аспирант НУК им. адм. Макарова, Николаев

МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В АВАРИЙНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Введение. Основными потребителями электроэнергии на судах являются асинхронные электродвигатели. Поскольку пусковой ток асинхронного двигателя в несколько раз превышает его номинальный, то при пуске возникают значительные провалы напряжения (ПН) сети, которые негативно отражаются на работающих потребителях, а также могут привести к возникновению аварийной ситуации и обесточиванию системы [1]. С целью повышения достоверности расчетных значений токов короткого замыкания и пусковых токов мощных нагрузок, учитывая, что предприятие-изготовитель электrorаспределительных устройств (ЭРУ) несет ответственность за качество функционирования электростанции, необходимо выполнить дополнительные проверки на модели судовой электроэнергетической системы (СЭЭС). Коммутационная аппаратура дополнительно проверяется как по току перегрузки (токо-временные зависимости), так и по величине тока короткого замыкания (КЗ) с помощью специальных станций. Это обусловлено прежде всего тем, что электромагнитные контакторы имеют низкую точность срабатывания. Электронные обеспечивают высокую точность, но их стоимость значительно выше.

Провалы напряжения (ПН) влияют на подключенные к сети потребители электроэнергии, которые могут иметь различные уровни устойчивости к ПН. Превышение уровня устойчивости электроприемника к ПН, как правило, приводит к нарушению условий его нормального функционирования или отказу. Исследованию процессов в асинхронных короткозамкнутых электродвигателях судового исполнения [2, 3]. В них представлены теоретические и экспериментальные исследования как прямого пуска с различными по величине и характеру моментами сопротивления на валу двигателя, так и регулируемого. Однако в этих работах было принято, что источник питания – трехфазный генератор – имеет бесконечную мощность, т.е. не учитывалось влияние на сеть токов как при прямом пуске двигателя.

Таким образом, существует актуальная научная задача разработки перспективных судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) с защитой от провалов напряжения.

Решение этой научной задачи предполагает постановку двух взаимосвязанных задач:

1) получение вероятностно статистических оценок провалов напряжения (длительностей и величин провалов и всплесков напряжения), возникающих случайным образом, и принимаемых в качестве исходных данных для разработки мероприятий по снижению провалов и всплесков напряжения в СЭЭС;

2) проектирование СЭЭС на основе разработки методов и средств преодоления появления провалов и всплесков напряжения, обеспечивающих повышение бесперебойности питания ответственных потребителей электроэнергии.

Модели СЭЭС могут быть использованы и для решения задач оптимизации расположения ЭРУ в машинном отделении судна, а также при оценке возможных путей снижения величины токов короткого замыкания (КЗ) за заранее установленные пределы.

Целью работы является разработка модели судовой электроэнергетической системы и исследование её работы в аварийных и динамических режимах для оценки величины изменения напряжения в различных точках и осуществления наиболее обоснованного выбора мероприятий по оптимизации качества электроэнергии.

Материалы исследования. Для расчета характеристик ПН необходимо учитывать реальную структуру и конфигурацию СЭЭС и ее режим работы электрооборудования, подключенных к шинам. Модель исследуемой СЭЭС должна отражать ее так подробно, чтобы выполненные расчеты дали возможность определять не только напряжения в интересующих узлах, но и отклонения этих параметров от нормальных установившихся значений.

На рис.1 представлена схема для расчета токов КЗ. Схема ориентирована на типовой широкий ряд электростанций, имеющих три дизель-генераторных агрегата, и диапазон мощностей генерирующих агрегатов находится в диапазоне от сотен кВт до нескольких тысяч [1]. Такие автономные электростанции находят применение не только в судовой практике, и широко используются в качестве резервных электростанций на предприятиях с непрерывным циклом работы. При расчете системы необходимо определить значения токов КЗ на таких элементах: шинах генератора, распределительных или коммутационных щитах, подключенных к генераторным шинам главного распределительного щита, которые получают питание через трансформатор.

© В.М. Рябенский, А.О. Ушкаренок, Язид Джамал Исмаил Аль-шайх, 2015

В аварийных режимах работы электростанции расчеты токов короткого замыкания для системы должны охватывать токи КЗ, произведенные всеми двигателями и генераторами, подключенными к системе, включая токи на генераторных шинах, вторичных коммутационных щитах и распределительных щитах.

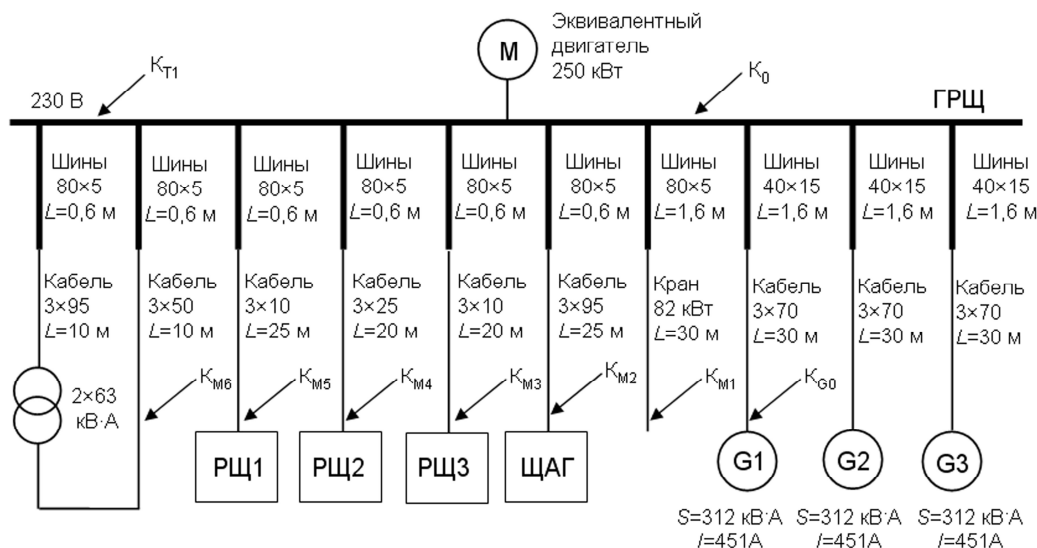


Рис. 1. Схема для расчета токов короткого замыкания.

Значение минимального напряжения в относительных единицах при работе электростанции в динамических режимах (пуск мощного асинхронного двигателя) определяется по формуле [5]:

$$U_{\min} = U_{нач} + (U_{нач} - U_{уст}) e^{-t_{\min}/\tau'_d} + k_2 k \left[t_{\min} - \tau'_d \left(1 - e^{-t_{\min}/\tau'_d} \right) \right], \quad (1)$$

где $t_{\min}$ — время достижения минимального значения напряжения для генератора с самовозбуждением [5]:

$$t_{\min} = \tau'_d \ln \left(\frac{U_{нач} - U_{уст}}{k_2 k \tau'_d} \right), \quad (2)$$

начальное напряжение в выражении (3) можно определить по формуле:

$$U_{нач} = E'_d \frac{x_d}{x_g + x'_d}, \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{x_g}{x_g + x'_d}, \quad (4)$$

где r_a , x_d , x_q — относительные активное и реактивное сопротивления по продольной и поперечной осям.

Установившееся напряжение в (1) определяется выражением:

$$U_{уст} = E_d \frac{x_g}{x_g + x_d}, \quad (5)$$

постоянная времени обмотки возбуждения в (2) при замкнутой обмотке статора с сопротивлением x_g :

$$\tau'_d = \tau'_{d0} \frac{x_g + x'_d}{x_g + x_d}, \quad (6)$$

реактивное сопротивление двигателя в формулах (3)-(6):

$$x_g = \frac{S_{нг}}{k_{II} S_{нд}} \left(\frac{U_{нд}}{U_{нг}} \right)^2, \quad (7)$$

где $S_{нг}$, $U_{нг}$ — номинальные мощность и напряжение генератора, $S_{нд}$, $U_{нд}$ — номинальные мощность и напряжение двигателя, k_n — кратность пускового тока двигателя по отношению к номинальному.

На рис. 2 представлена модель СЭЭС, созданная в пакете MatLab и ориентирована для моделирования аварийных режимов, то есть оценки значений токов КЗ. Электростанция содержит три 3-х фазных источника переменного напряжения (3-Phase Source) с действующим значением линейного напряжения 380 В. Источники работают на активно-индуктивную трехфазную нагрузку. Порты моделей А, В и С являются выводами статор-

ных обмоток машин. Блоки RMS и RMS1 показывают действующие значения токов фазы. На выходных портах m_SI формируются векторные сигналы, состоящие из 12 элементов: токов (isa, isb, isc), напряжений (va, vb, vc) и ЭДС (ea, eb, ec) обмотки статора, углового положения (thetam) и скорости ротора (vm), а также электромагнитной мощности (Pe). Для удобства извлечения переменных машин из выходных векторов измеряемых переменных в библиотеке SimPower Systems предусмотрен блок Machines Measurement Demux. Сигналы, равные механической мощности на валу машин, подаются на входные порты Pm, а на выходные порты E подаются сигналы, задающие действующие значения линейных ЭДС обмоток статоров.

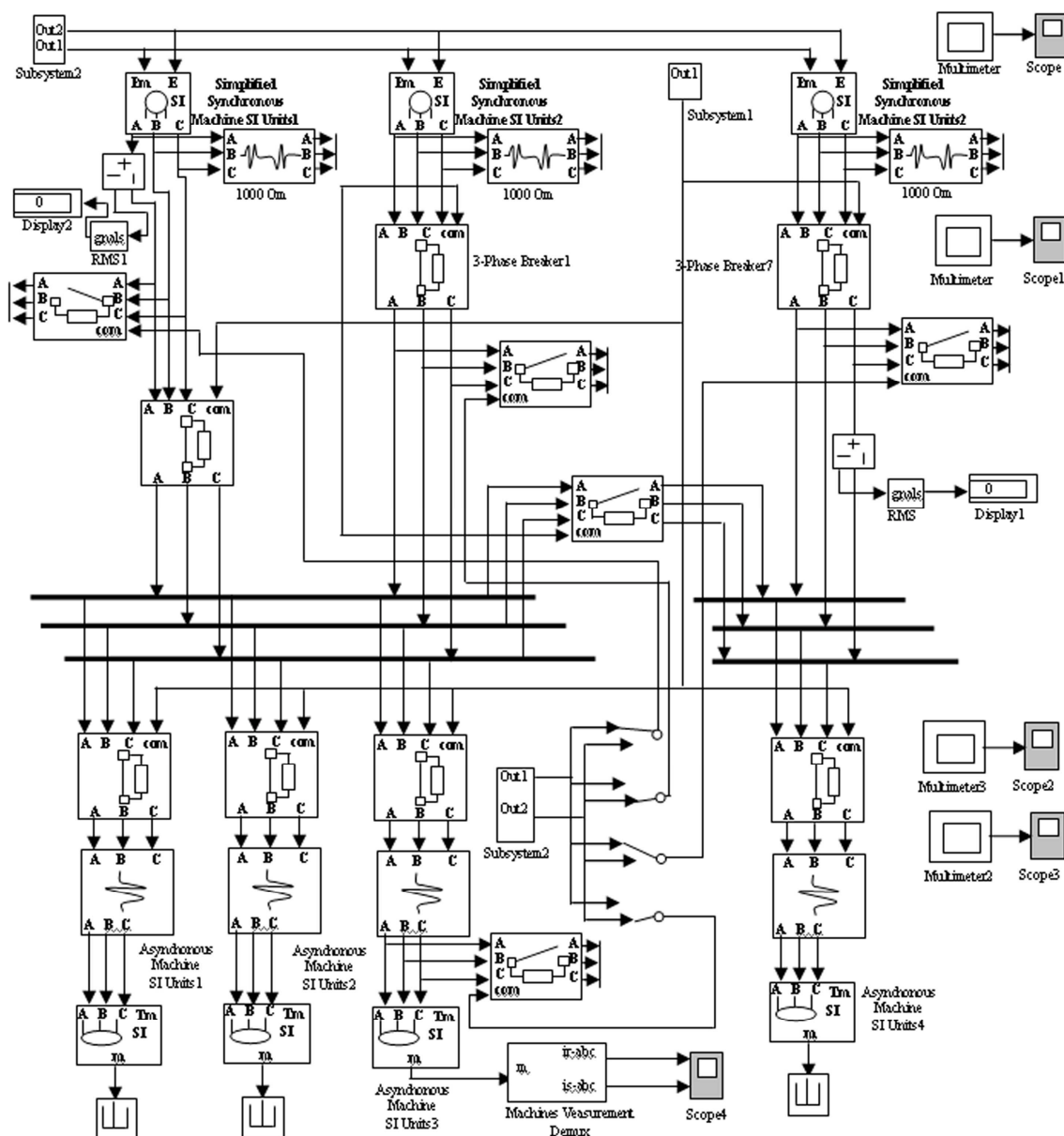


Рис. 2. Схема судовой электростанции.

Методики расчета применяются для состояния трехфазного симметричного короткого замыкания, то есть когда трехфазные проводники замкнуты друг на друга или на корпус судна, и когда короткое замыкание возникает на всех трех полюсах одновременно. Для определения токов короткого замыкания используются блоки 3-Phase Fault, в которых в определенный момент времени происходит межфазное короткое замыкание. Управление блоком 3-Phase Fault осуществляется через порт com. При подаче управляющего сигнала происходит короткое замыкание в цепи.

Короткое замыкание можно моделировать непосредственно в источнике напряжения, на линии передачи напряжения, и непосредственно на нагрузке. Выбор места короткого замыкания осуществляется с помощью ручных переключателей Manual Switch, которые соединены с блоком Subsystem (сигнал 1 – верхний вывод или 0 – нижний вывод). С помощью ключей управляющие сигналы подаются на тот или иной блок 3-Phase Fault. Манипулируя ключами, задается короткое замыкание на нагрузке Load 3. В результате моделирования были

получены осциллограммы напряжения и тока короткого замыкания, представленные на рис. 3, а. Для сравнения на рис. 3, б, представлены графики токов и напряжений на нагрузке Load1, где короткое замыкание отсутствовало.

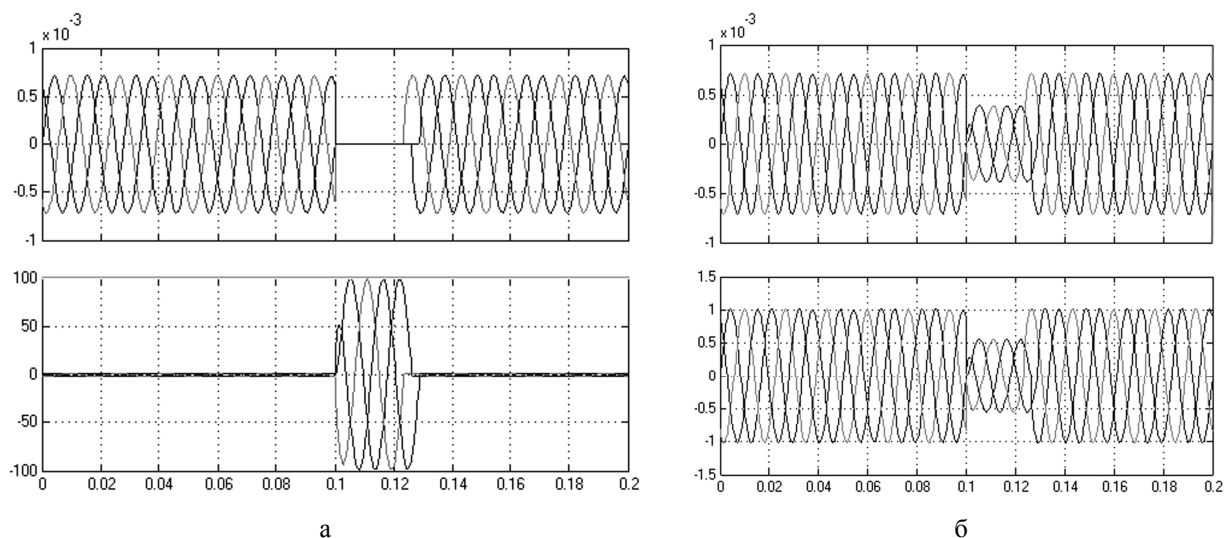


Рис. 3. Результаты моделирования: а – осциллограммы напряжений и токов на нагрузке Load3; б – осциллограммы токов и напряжений на нагрузке Load1

Выводы. Для расчета характеристик провалов напряжения необходимо учитывать реальную структуру и конфигурацию энергосистемы, а также режим работы электрооборудования. Модель исследуемой электростанции должна отражать ее достаточно подробно для того, чтобы выполненные расчеты дали возможность определять не только напряжения, токи, мощности в интересующих узлах, но и отклонения этих параметров от нормальных постоянных значений. Разработанная модель позволяет решать задачи определения токов короткого замыкания и пусковых токов мощных потребителей электроэнергии, например, асинхронных двигателей. Сравнительная оценка теоретических методов расчета и модельных исследований показали высокую степень точности результатов моделирования. Максимальный разброс расчетных значений не превышает 10%, что вполне достаточно для таких решения задач. При расчете пиковых значений пусковых токов погрешности также находились в пределах 10-15%. Однако для практики расчета пусковых токов важное значение имеют токовременные характеристики автоматических выключателей. В этом отношении модельные исследования и получение кривых переходных процессов пуска мощных потребителей дают возможность более точно выбирать тип автоматического выключателя и его уставки. Минимизация ущерба от провалов напряжения достигается комплексом мероприятий, применением специальных быстродействующих систем защит и автоматики, внедрением эффективных структур и методов запуска ответственных электродвигателей. Наиболее эффективным способом, решающих проблемы провалов напряжения, является упреждающее управление.

Список литературы: 1. Подимака В. І. Розрахунок струмів короткого замикання в судових електроенергетичних системах: Методичні вказівки / В. І. Подимака, А. А. Ставинський, В. К. Чекунов. – Миколаїв: НУК, 2004. – 32 с. 2. Карандашов Ю. С. Математическое моделирование электрических нагрузок судовых электростанций / Ю. С. Карандашов // Судостроение. – Москва: Судостроение, 2004. – №2. – С. 31–34. 3. Hatzilau I. K. On electric load characterization and categorization in ship electric installations / I. K. Hatzilau, G. J. Tsekouras, J. M. Prousalidis // IEEE Transactions on Power Systems. – IEEE: Piscataway, 2007. – №3. – Р. 1120-1128. 4. Арешян Г. Л. Провалы напряжений и токи при пуске асинхронного двигателя от автономного синхронного генератора / Г. Л. Арешян // Электричество. – Ереван: Известия НАН РУ и ГИУА, 2000. – Том LIII. – №3. – С. 345-352. 5. Яковлев Г. С. Судовые электроэнергетические системы / Г. С. Яковлев. – Л.: Судостроение, 1980. – 288 с.

Bibliography (transliterated): 1. Podymaka, V. I., Stavyns'kyi A. A., Chekunov V. K. Rozrakhunok strumiv korotkoho zamykannya v sudnovykh elektroenerhetychnykh systemakh: Metodychni vkazivky. – Mykolayiv: NUK, 2004. – 32 s. 2. Karandashov Yu. S. Matematycheskoe modelyrovanye elektrycheskykh nahruzok sudovykh elektrostantsyy. Sudostroenye. Moskva: Sudostroenye, 2004. No. 2. – S. 31-34. 3. Hatzilau I. K., Tsekouras G. J., Prousalidis J. M. On electric load characterization and categorization in ship electric installations. IEEE Transactions on Power Systems. – IEEE: Piscataway, 2007. – №3. – P. 1120-1128. 4. Arashyan H. L. Provaly napryazheniy y toky pry puske asykhronnoho dvyyhatelya ot avtonomnoho synkhronnoho heneratora. Elektrichestvo. – Erevan: Yzvestyya NAN RU y HYUA, 2000. – Tom LIII. – No. 3. – S. 345-352. 5. Yakovlev G.S. Sudovie elektroenergeticheskie sistemy. – L.: Sudostroenie, 1980. – 288 s.

Поступила (received) 08.08.2015