

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПРИ ПУСКЕ МОЩНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

*Конева С.А., Пронина А.К., Стрижак В.Н., Тиам Омар, Ходак Е.Н.
Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия*

Ключевые слова: асинхронный двигатель, переходный процесс, провал напряжения, система стабилизации напряжения, синхронный генератор, качество электроэнергии.

Аннотация. Выполнен анализ электромеханического переходного процесса, возникающего в генераторном агрегате судовой электростанции в случае прямого пуска асинхронного двигателя. Выполнена экспериментальная и аналитическая оценка процесса и построены графики переходного процесса при различных способах стабилизации напряжения синхронного генератора. Анализ процесса пуска потребителя от судового синхронного генератора соизмеримой мощности показывает актуальность вопроса использования системы стабилизации напряжения с целью повышения качества электроэнергии.

ANALYSIS OF THE TRANSIENT PROCESS IN A SHIP'S POWER PLANT DURING THE START-UP OF A POWERFUL CONSUMER

*Koneva S.A., Pronina A.K., Strizhak V.N., Tiam Omar, Khodak E.N.
Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

Keywords: asynchronous motor, transition process, voltage dip, voltage stabilization system, synchronous generator, power quality.

Abstract. The analysis of the electromechanical transient process occurring in the generator unit of the ship's power plant in the case of direct starting of the asynchronous motor is performed. The experimental and analytical assessment of the process is performed and the graphs of the transient process are constructed for different methods of stabilizing the voltage of the synchronous generator. The analysis of the process of starting the consumer from the ship's synchronous generator of comparable power shows the relevance of the issue of using a voltage stabilization system in order to improve the quality of electricity.

Введение

Одной из существенных проблем судовых электроэнергетических систем является вопрос повышения качества электроэнергии в переходных режимах, т.е. стабилизации напряжения при включении различных потребителей соизмеримых по мощности с мощностью генератор [1]. Этот вопрос осложняется тем, что с каждым годом увеличивается количество потребителей, построенных на современной элементной базе, которые требуют стабилизированного напряжения. Кроме того, следует отметить, что судовые электроэнергетические системы (СЭЭС) обладают рядом своих специфических особенностей. Они состоят в следующем:

Во-первых, в судовых электроэнергетических системах 80% всей нагрузки составляют асинхронные двигатели (АД), а именно, асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, у которых пусковой вращающий момент пропорционален квадрату напряжения.

Во-вторых, в СЭЭС имеется большое количество потребителей (АД) соизмеримых по мощности с мощностью синхронных генераторов. К ним относятся электрические компрессоры, пожарные насосы, насосы балластных систем и др.

В-третьих, при пуске таких мощных АД возникают провалы напряжения в сети, которые приводят к сбою или выходу из строя ответственных потребителей (радиоэлектронные приборы, приборы управления, вычислительная и компьютерная техника и др.).

Провалы напряжения возникают в результате снижения коэффициента мощности, при пуске $\cos \varphi_{II} = 0,30$ и большой кратности пускового тока АД, величина которого определяется как:

$$Ki = I_{II} / I_H = 6 \div 7,$$

где I_H – номинальное значение тока АД; I_{II} – пусковой ток АД.

Низкий $\cos \varphi_{II}$ создает большую реактивную составляющую тока статора, которая вызывает продольно размагничивающую реакцию якоря синхронного генератора, вследствие чего происходит снижение магнитного потока, то есть размагничивание генератора и, как следствие, резкого снижения напряжения генератора на шинах ГРЩ. Поэтому, актуальным при проектировании и эксплуатации судовой электроэнергетической системы, является необходимость в оценке величины провала напряжения сети [2].

При эксплуатации судовых электростанций важно, чтобы величина провала напряжения не превышали допустимых значений, регламентированных требованиями Морского регистра, допускающих кратковременный (не более 1,5 с) провал по напряжению не более 20%U[3]. Превышение допустимых пределов может привести к потере устойчивой параллельной работы судовых генераторных агрегатов и выпадению их из синхронизма. Также, глубокий затянувшийся провал напряжения может привести к нарушению устойчивой работы работающих асинхронных двигателей, поскольку их вращающий момент пропорционален квадрату напряжения сети.

Аналитическая и экспериментальная оценка процесса пуска асинхронного двигателя

В процессе исследования данного вопроса аналитическим методом был выполнен расчет провала напряжения при пуске асинхронного двигателя АО2-51-6/4 мощностью 4,5 кВт от одного работающего синхронного генератора типа ЕССМ-62 $P_H = 12$ кВт, а также проведено практическое исследование величины провала напряжения с включенной системой стабилизации напряжения ТФК и без использования системы стабилизации.

После определения исходных данных для расчета и приведения всех величин к базисным условиям (базисное напряжение, базисная мощность и базисный ток), построена эквивалентная схема замещения (рис. 1).

Рассчитав полное сопротивление внешней цепи, определено минимальное напряжение при пуске АД по выражению [2]:

$$U_{\min} = \sqrt{\frac{(r_{*внб}^2 + (x_{*внб} + x'_{*qb})^2) \cdot (r_{*внб}^2 + x_{*внб}^2)}{r_{*внб}^2 + (x_{*внб} + x'_{*qb}) \cdot (x_{*внб} + x'_{*db})}}. \quad (1)$$

где $r_{*внб}$ и $x_{*внб}$ – активное и индуктивное сопротивления внешней цепи, приведенные к базисным условиям; x'_{*db} , x_{*qb} – переходное сопротивление обмотки статора генератора по продольной и поперечной оси; $r_{*1б}$; $x_{*кб}$ – базисные параметры активного и индуктивного сопротивления генератора; $r_{*кб}$, $x_{*кб}$ – активное и индуктивное сопротивление кабельной линии от АД до главного распределительного щита ГРЩ.



Рис. 1. Эквивалентная схема замещения

Сопротивления, приведенные к базисным значениям:

$$r_{*внб} = r_{*кб} + r_{*днб}; \quad x_{*внб} = x_{*кб} + x_{*днб}.$$

В результате выполненных расчетов было установлено, что минимальное напряжение составило 0,82 о.е.

Таким образом, максимальный провал напряжения $U_{*max} = 1 - U_{\min} = 0,18$, то есть 18%. Как видим, полученная величина удовлетворяет требованиям Морского Регистра, но находится в предельно допустимых пределах и требует принятие мероприятий по его снижению. Поэтому актуальным является исследование переходных процессов пуска в электроэнергетической системе [4] для предотвращения провалов напряжения и снижения качества электроэнергии.

Для построения кривой $U_t = f(t)$ воспользуемся известным выражением [3].

$$U(t) = U_{\min} \cdot \left[U_y \cdot \frac{\tau'_d}{\tau'_{d0}} \cdot (1 - e^{-t/\tau'_d}) + E'_{d0} \cdot e^{-t/\tau'_d} \right], \quad (2)$$

где τ'_d, τ'_{d0} – постоянные времени СГ при работе под нагрузкой (сек), k_f – коэффициент форсировки возбуждения; U_y – напряжение АД по окончании процесса пуска (о.е), в установившемся режиме; $E'_{d0} = 1$ – ЭДС генератора на холостом ходу (о.е).

Экспериментально проводится опыт с включением системы стабилизации напряжения с трансформатором фазового компаундирования (ТФК), задача которого обеспечить прямое компаундирования по отклонению параметра напряжения. А также провести опыт без использования ТФК и провести сравнительный анализ результатов. На рисунке 2 приведена схема экспериментальной установки для исследования величины провала напряжения опытным путем. Установка позволяет снять экспериментальные данные при прямом пуске асинхронного двигателя от одного работающего синхронного генератора, работающего как с системой стабилизации

напряжения, построенной на базе трансформатора фазового компаундирования (ТФК), так и с отключенной системой стабилизации [5].

Используя математический пакет MathCAD, построен график максимального провала напряжения, представленный на рисунке 3, кривая 1.

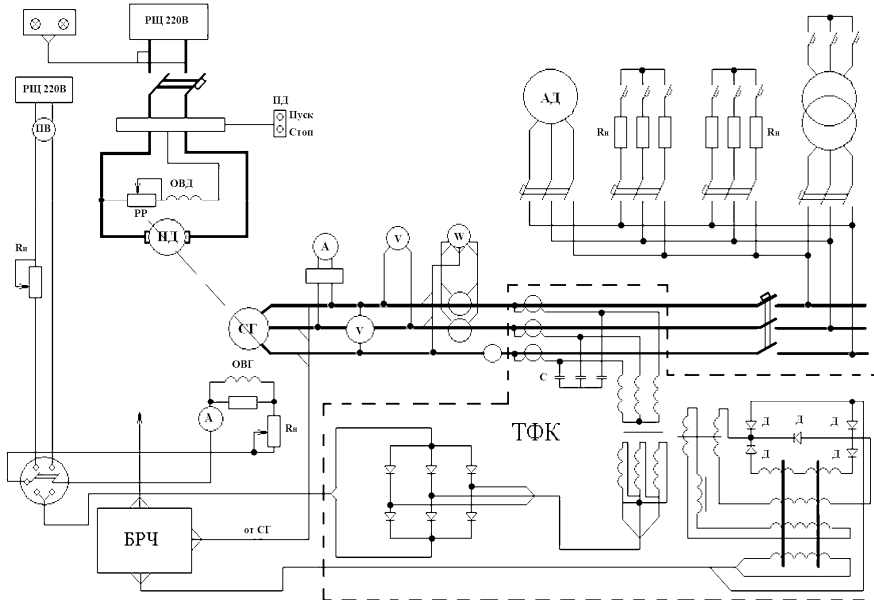


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

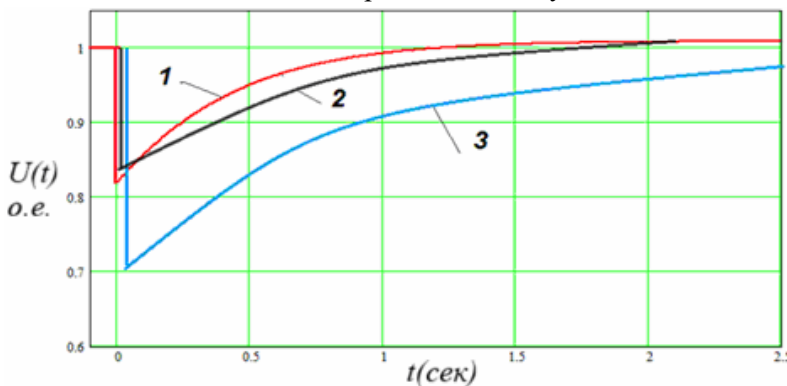


Рис. 3. Графики провала напряжения

Заключение

Полученные результаты эксперимента свидетельствуют, что при включенной системе стабилизации напряжения с трансформатором фазового компаундирования (ТФК) провал напряжения составил 17% от номинального напряжения (рис. 3, кривая 2).

При отключенной системе стабилизации провал составил 30%, а время восстановления более 5 с (рис. 3, кривая 3), что существенно превышает допустимые Морским Регистром требования, что негативно отражается на качестве электроэнергии на судне.

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что в судовых условиях прямой пуск асинхронного двигателя мощностью, соизмеримой с

мощностью генераторного агрегата не допустим, если генератор не снабжен системой стабилизации напряжения.

Список литературы

1. Коробко Г.И., Попов С.В., Лебедев В.В., Макаев А.С. Повышение качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах с использованием вольтодобавочных устройств // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2012. – №1(94). – С.192-204.
2. Сугаков В.Г., Хватов О.С. Системы автоматического регулирования параметров электрической энергии судовых электростанций. Ч. 2. Автоматическое регулирование напряжения судовых источников электрической энергии. Учебное пособие. – Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2011. – 180 с.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Морской Регистр судоходства. – СПб.: Регистр РФ, 2021. – 843 с.
4. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах. – М.: Мир, 2003. – 283 с.
5. Коноплев К.Г., Конева С.А. Системы автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 87 с.

References

1. Korobko G.I., Popov S.V., Lebedev V.V., Makaev A.S. Improving the quality of electric power in ship electric power systems using step-up devices // Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev. 2012, no. 1(94), pp. 192-204.
2. Sugakov V.G., Khvatov O.S. Automatic Control Systems for Electrical Power Parameters of Ship Power Plants. Part 2. Automatic Voltage Regulation of Ship Electrical Power Sources. Textbook. – N. Novgorod: Publ. house of FBOOU HPO VГАVT, 2011. – 180 p.
3. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Vessels. Maritime Register of Shipping. – SPb.: Register RF, 2021. – 843 p.
4. Kulikov Yu. A. Transient processes in electrical systems. – M.: World, 2003. – 283 p.
5. Konoplev K.G., Koneva S.A. Automatic voltage regulation systems for synchronous generators. – Sevastopol: Publ. house of SevNTU, 2007. – 87 p.

Конева Светлана Андреевна – кандидат технических наук, доцент; заведующая кафедрой «Судовое электрооборудование»	Koneva Svetlana Andreevna – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department «Ship's electric equipment»
Пронина Анна Константиновна – доцент кафедры «Судовое электрооборудование»	Pronina Anna Konstantinovna – associate professor of the Department «Ship's electric equipment»
Стрижак Владислав Николаевич – доцент кафедры «Судовое электрооборудование»	Strizhak Vladislav Nikolaevich – associate professor of the Department «Ship's electric equipment»
Тиям Омар – студент	Tiam Omar – student
Ходак Евгений Николаевич – доцент кафедры «Судовое электрооборудование»	Khodak Evgeny Nikolaevich – associate professor of the Department «Ship's electric equipment»
pronina-a@bk.ru	

Received 05.02.2026