

*В. Г. Сугаков, О. С. Хватов,
Ю. С. Малышев, А. А. Тоцев, И. В. Сычушкин*

ВНЕШНЯЯ ФОРСИРОВКА СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Рассмотрены задачи, возлагаемые на системы автоматического регулирования возбуждения (САРВ), и классификация САРВ. Проведен анализ возможностей существующих САРВ с точки зрения выполнения описанных задач и обеспечения качества генерируемого напряжения, рассмотрены их достоинства и недостатки. Показано, что на САРВ, используемые в современной промышленности, в общем случае возлагаются задачи по обеспечению надежности и качества электроснабжения. Эксплуатируемые САРВ могут быть классифицированы по ряду признаков, основными из которых являются: тип системы возбуждения; наличие щеточно-контактного узла; принцип регулирования; способ воздействия на возбуждение синхронного генератора, тип характеристик, наличие форсировки. Анализ существующих САРВ показывает, что форсировочная способность систем возбуждения с внутренней форсировкой недостаточна, т. к. возбуждение возрастает за счет внутренних ресурсов системы возбуждения, которые ограничены. В системах с внешней форсировкой увеличение возбуждения осуществляется за счет внешнего источника, ресурсы которого могут быть многократно больше, чем при внутренней форсировке, и ее можно организовать для систем возбуждения синхронных генераторов любого типа. Система автоматического регулирования возбуждения с управляемой внешней форсировкой обладает высоким быстродействием форсировки возбуждения и обеспечивает высокую форсировочную способность, которая ограничена лишь параметрами внешнего источника. Недостатком данной системы является возможность перевозбуждения генератора, поскольку возбуждение увеличивается всегда на одну и ту же величину, которая определяется параметрами внешнего источника. Избежать указанного недостатка позволяет САРВ с управляемой внешней форсировкой. Степень форсировки возбуждения, которая является функцией максимального приращения тока нагрузки генератора, обеспечивает высокое быстродействие и точность, исключая возможность перерегулирования. Кроме того, повышение форсировочной способности САРВ синхронного генератора снижает величину и длительность провалов напряжения в динамических режимах и улучшает условия включения их на параллельную работу методом самосинхронизации.

Ключевые слова: система автоматического регулирования возбуждения, форсировка возбуждения, синхронный генератор, качество регулирования напряжения.

Состояние проблемы и постановка задачи

На системы автоматического регулирования возбуждения (САРВ), используемые в современной промышленности, возлагаются следующие задачи:

- устойчивое регулирование (стабилизация) напряжения генератора во всех эксплуатационных режимах с заданной точностью;
- пропорциональное распределение реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами;
- повышение статической и динамической устойчивости генератора при работе в энергосистеме;
- обеспечение режимов пуска асинхронных двигателей и включения генератора на параллельную работу методами точной синхронизации и самосинхронизации;
- быстрое восстановление напряжения после отключения короткого замыкания и обеспечение самозапуска асинхронных электродвигателей;
- повышение надежности пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей мощностью, соизмеримой с мощностью генератора;
- повышение надежности действия устройств релейной защиты в системе электроснабжения;
- обеспечение надежной синхронизации [1–10].

Находящиеся в эксплуатации системы автоматического регулирования напряжения могут быть классифицированы по ряду признаков, основными из которых являются: тип системы возбуждения (СВ); наличие щеточно-контактного узла; принцип регулирования; способ воздействия на возбуждение синхронного генератора (СГ); тип статических и динамических характеристик; наличие форсировки (рис. 1) [1, 2, 6, 9, 10].

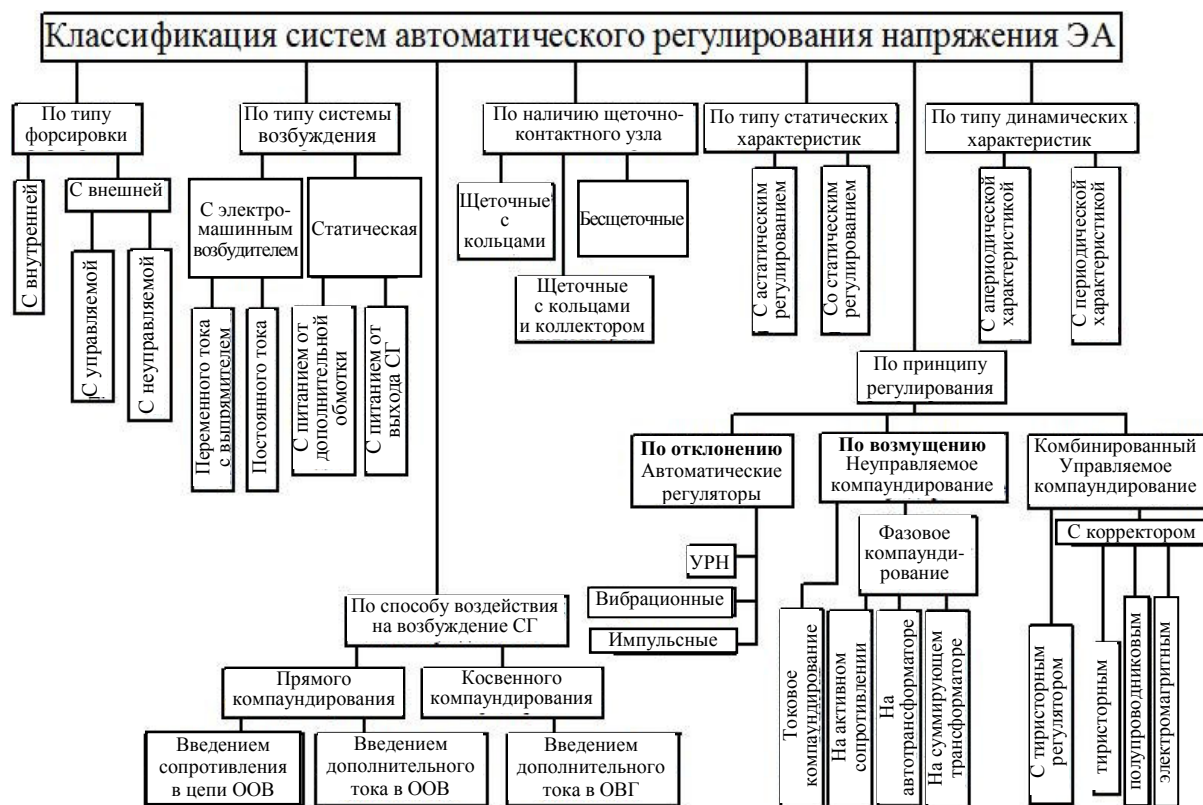


Рис. 1. Классификация систем автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов судовых источников электрической энергии:
 ЭА – электрические агрегаты; ОВВ – обмотка возбуждения возбудителя;
 ОВГ – обмотка возбуждения генератора;
 УРН – устройство регулирования напряжения

По типу СВ различают САРВ с электромашиной и статической системами регулирования. В качестве возбудителя используют генератор постоянного тока или синхронный возбудитель с вращающимся выпрямителем, а статическая система может получать питание от дополнительной или основной якорной обмотки. В генераторах серии ДГС нашли применение СВ с электромашиным возбудителем постоянного тока, а в генераторах серий ГС, ГС2, ГСМ, 2СН – электромашины возбудители переменного тока с выпрямителем. Статические СВ с питанием от выхода СГ реализуются в генераторах ГСФ, ДГФ, а с питанием от дополнительной обмотки – в генераторах ГАБ, ГА, ОС [1, 2, 6, 9, 10].

По наличию щеточно-контактного узла САРВ разделяют на бесщеточные, щеточные с контактными кольцами, щеточные с контактными кольцами и коллектором. Наиболее перспективными являются бесщеточные САРВ, имеющие высокую надежность благодаря отсутствию скользящих контактов. Они применяются в генераторах серий ГС, ГС-2, ГСМ, 2СН. Щеточные с контактными кольцами САРВ применяются в СГ со статической системой регулирования (серий Г05, Г40, ГСФ); щеточные с контактными кольцами и коллектором в СГ с возбудителем постоянного тока (ДГС) [1, 2, 6, 9, 10].

Комбинированные САРВ реализуют принципы регулирования по отклонению и возмущению и обладают их достоинствами. В таких системах, наряду с замкнутым контуром, образованным главной обратной связью, имеется цепь компенсации основного возмущающего воздействия. Управляющее воздействие в этом случае является функцией возмущающего воздействия и отклонения напряжения от его заданного значения, т. е. функцией ошибки. Отрицательное действие всех неучтенных возмущений в комбинированных САРВ компенсируется или ослабляется контуром регулирования по отклонению, который осуществляет управление компаундированием. Схемы, реализующие комбинированный принцип регулирования, называют схемами управляемого компаундирования, в отличие от схем неуправляемого компаундирования, в которых реализуется лишь принцип регулирования по возмущению [1, 2, 6, 9, 10].

Качество и устойчивость регулирования напряжения при внезапном изменении оцениваются по динамической характеристике, описывающей изменение напряжения во времени в процессе регулирования. Различают периодические и аperiodические характеристики, которые могут быть сходящимися или устойчивыми и расходящимися или неустойчивыми. Тип динамической характеристики САРВ зависит от параметров элементов схемы, поэтому при их подборе стремятся обеспечить устойчивое регулирование.

Поведение напряжения в процессе регулирования при плавном изменении нагрузки оценивается по внешней характеристике, которая может быть статической или астатической.

По способу воздействия на возбуждение СГ все САРВ можно разделить на системы прямого и косвенного компаундирования. В случае прямого компаундирования оказывается непосредственное воздействие на величину тока индуктора СГ. При косвенном компаундировании воздействие осуществляется через возбудитель путем введения дополнительного тока в ОВВ или изменения сопротивления ее цепи [1, 2, 6, 9, 10].

Более современный признак для классификации – по типу форсировки: системы с внешней форсировкой и системы с внутренней форсировкой. Под форсировкой возбуждения генератора понимают быстрое увеличение напряжения возбуждения до предельного значения. Внутренняя форсировка возбуждения обеспечивается за счет внутренних ресурсов СВ, которые ограничены. Например, кратность форсировки возбуждения составляет от 2,5 для СГ с электромашинными возбудителями до 8 для бесщеточных СГ с тиристорами в СВ.

В системах с внешней форсировкой увеличение возбуждения осуществляется за счет внешнего источника, ресурсы которого могут быть многократно больше, чем при внутренней форсировке. Достоинством внешней форсировки является то, что ее можно организовать для СВ СГ любого типа путем введения дополнительной цепи внешней форсировки. Кроме того, системы с внешней форсировкой можно разделить на системы с неуправляемой и системы с управляемой форсировкой.

Таким образом, недостатками большинства комбинированных САРВ являются невысокая форсировочная способность и, как следствие, невозможность пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, соизмеримых по мощности с генератором, и сложность обеспечения условий синхронизации и параллельной работы двух и более генераторов. Эти недостатки особенно характерны для генераторов большой мощности [1, 2, 11–14].

Эффективным способом повышения устойчивости параллельной работы СГ является воздействие на его возбуждение. Если в моменты избыточной мощности первичного двигателя с помощью САРВ форсировать возбуждение генератора, а в момент его недостаточной мощности развозбудить генератор, то в соответствии с изменением тока возбуждения будут меняться электродвижущая сила (ЭДС) и активная мощность генератора, обеспечивая демпфирование колебаний ротора и повышение устойчивости работы генератора [14–16].

Форсировочная способность СВ определяется коэффициентом форсировки возбуждения K_{ϕ} :

$$K_{\phi} = U_{в.п} / U_{в.ном},$$

где $U_{в.п}$ – потолочное напряжение возбуждения; $U_{в.ном}$ – номинальное напряжение возбуждения.

Форсировочная возможность СВ с внутренней форсировкой жестко ограничена параметрами трансформаторов, входящих в состав СВ. С учетом вышесказанного необходима разработка устройств, не имеющих таких ограничений.

Способы решения задачи

Для решения поставленной задачи может быть использована САРВ с неуправляемой внешней форсировкой (рис. 2), которая обладает высоким быстродействием форсировки возбуждения и обеспечивает высокую форсировочную способность, ограниченную лишь параметрами внешнего источника.

Начальное возбуждение может происходить за счет остаточного магнитного потока генератора 1 или от внешнего источника 11, при недостаточном остаточном магнитном потоке. При этом подается короткий сигнал на шину 28 ПУСК, который через логический элемент ИЛИ 27 открывает ключ 12 и кратковременно подключает внешний источник к индуктору 3. Напряжение с якорной обмотки 2 генератора подается на обмотку напряжения 7 суммирующего транс-

форматора 4. С обмотки 8 ЭДС, наводимая обмоткой 7, поступает через выпрямитель 4, и по обмотке индуктора 3 протекает ток возбуждения, обеспечивающий заданный уровень напряжения на холостом ходу и при малых нагрузках.

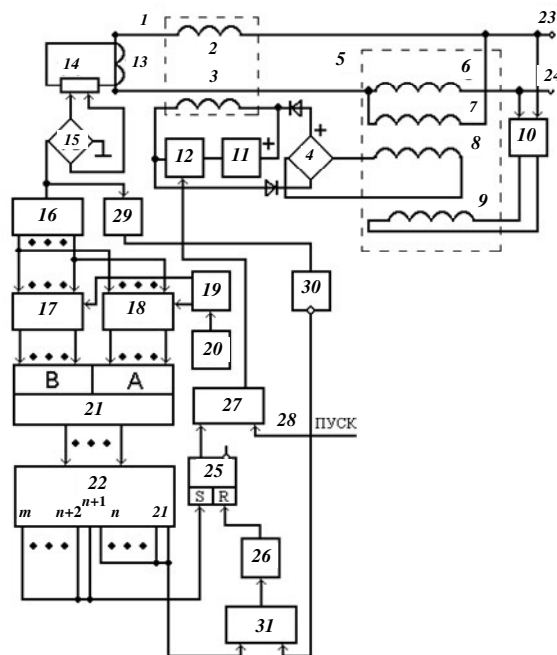


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема системы возбуждения синхронного генератора с неуправляемой внешней форсировкой: 1 – синхронный генератор; 2 – обмотка якоря; 3 – индуктор; 4, 15 – выпрямитель; 5 – суммирующий трансформатор; 6 – токовая обмотка; 7 – обмотка напряжения; 8 – вторичная обмотка; 9 – обмотка управления; 10 – корректор напряжения; 11 – внешний источник постоянного тока; 12 – электронный ключ; 13 – трансформатор тока; 14 – шунт; 16 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 17, 18 – регистр памяти; 19 – распределитель импульсов; 20 – генератор импульсов стабильной частоты; 21 – вычитатель; 22 – дешифратор; 23, 24 – выходы; 25 – RS-триггер; 26 – дифференциатор; 27, 31 – логические элементы ИЛИ и И; 28 – шина ПУСК; 29 – формирователь-ограничитель; 30 – инвертор

Для компенсации реакции якоря при подключении нагрузки последовательно с обмоткой якоря включена обмотка 6 трансформатора 5. Протекающий ток нагрузки индуцирует магнитодвижущую силу (МДС) обмотки 6, которая геометрически складывается с МДС обмотки 7. В результате суммарная МДС возрастает при активной и индуктивной нагрузке и уменьшается при емкостной нагрузке. Соответственно изменяется магнитный поток трансформатора 5, ЭДС в его вторичной обмотке 8 и ток возбуждения в обмотке индуктора 3. Таким образом, компенсируется действие реакции якоря, и напряжение генератора остается на прежнем уровне [17].

Повышение точности регулирования обеспечивается подачей тока на обмотку управления 8 трансформатора 5 с выхода корректора напряжения 10. Одновременно с процессами, описанными выше, производится анализ величины тока $i(t)$ нагрузки генератора, протекающего по первичной обмотке трансформатора 13.

Ток $i_2(t)$ вторичной обмотки трансформатора тока 13

$$i_2(t) = i(t)/k,$$

где k – коэффициент трансформации трансформатора 13.

Протекая по шунту 14, ток вторичной обмотки производит на нём падение напряжения

$$u_2(t) = i_2(t)r,$$

где r – сопротивление шунта 14, которое подается на вход выпрямителя 15. На выходе выпрямителя 15 появляется пульсирующее напряжение $u(t) = |u_2(t)|$, поступающее на вход АЦП 16. На выходе преобразователя 16 формируется код мгновенного значения входного напряжения

$$K(t) = u(t) / u_n,$$

где u_n – шаг квантования АЦП 16.

Этот код подается на информационные входы регистров памяти 17 и 18 [17].

Коды $K(t)$ и $K(t + \Delta t)$, соответствующие мгновенным значениям тока нагрузки $i(t)$ и $i(t + \Delta t)$ для смежных моментов времени, отличающихся на Δt , записываются в регистры памяти 17 и 18 по импульсам с генератора 20 и поступают на входы вычитателя 21. На выходе вычитателя 21 появится код, соответствующий текущему приращению тока нагрузки $|\Delta i / \Delta t|$ за фиксированный промежуток времени Δt . Код поступает на вход дешифратора 22, который формирует сигнал на одном из m выходов.

Если текущее приращение тока нагрузки не превышает допустимой величины, то сигнал появляется на одном из выходов дешифратора 22 с номерами от 1 до n , триггер 25 остается в состоянии «0» и форсировка возбуждения не производится.

В случае превышения приращением тока нагрузки генератора допустимой величины появляется сигнал на одном из выходов дешифратора 22 с номерами от $(n + 1)$ до m , который установит триггер 25 в единичное состояние, при этом появляется сигнал на его прямом выходе. Этот сигнал через элемент ИЛИ 27 откроет ключ 12 и подключит к обмотке индуктора 3 внешний источник 11, обеспечивая форсировку возбуждения. При снижении тока нагрузки до допустимых значений, например после завершения процесса пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, появляется сигнал на одном из выходов дешифратора 22 с номерами от 1 до n , который через элемент И 31 в момент времени, когда мгновенное значение тока близко к нулевому значению и наблюдается максимальное приращение тока, через дифференциатор 26 поступает на сбросовый вход триггера 25. Сигнал на прямом выходе триггера 25 исчезает. Закрывается ключ 12, отключая внешний источник 11 от обмотки 3 индуктора генератора [17].

Недостатком данной системы является вероятность перевозбуждения генератора, поскольку по факту превышения допустимой величины приращения тока нагрузки возбуждение увеличивается всегда на одну и ту же величину, которая определяется параметрами внешнего источника [12–14, 18].

Данный недостаток был устранен при разработке САРВ с управляемой внешней форсировкой. Повышение точности форсировки возбуждения достигается тем, что данная система позволяет обеспечить дозированную подачу возбуждения в зависимости от наброса нагрузки.

На рис. 3 представлена схема СВ СГ с управляемой внешней форсировкой.

Величина тока форсировки в схеме рис. 3 определяется напряжением внешнего источника 11 и проводимостью цепи форсировки, которая зависит от того, сколько и какие резисторы 32 включены. Включение резисторов 32-1...32- N производится ключами 31-1...31- N , управляющие электроды которых подключены к соответствующим разрядам выхода компаратора 21. Изменение кода приращения тока нагрузки на единицу приводит к изменению проводимости цепи форсировки на величину равную проводимости первой секции:

$$\Delta q = 1/R_1,$$

где R_1 – сопротивление резистора 32-1. Параллельно включенные секции, введенные между внешним источником постоянного тока и общим электронным ключом, обеспечивают с необходимой точностью управление степенью форсировки возбуждения в зависимости от приращения тока нагрузки генератора. Зависимость сопротивления резистора i -й секции от сопротивления резистора первой секции, и в соответствии с выражением $R_i = R_1/2^{(i-1)}$, обеспечивает одинаковое приращение проводимости цепи форсировки возбуждения при изменении на единицу кода тока нагрузки на выходе вычитателя во всем диапазоне регулирования. При этом приращение проводимости цепи форсировки возбуждения при изменении на единицу кода тока нагрузки на выходе вычитателя составляет Δq . Ограничительный резистор, включенный параллельно секциям, создает цепь начального возбуждения.

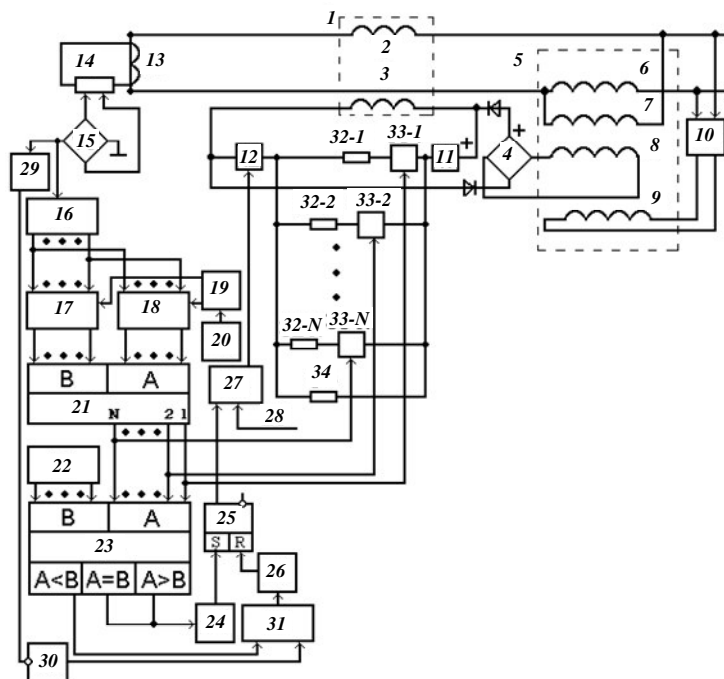


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема системы возбуждения синхронного генератора с управляемой внешней форсировкой: 1 – синхронный генератор; 2 – обмотка якоря; 3 – индуктор; 4, 15 – выпрямитель; 5 – суммирующий трансформатор; 6 – токовая обмотка; 7 – обмотка напряжения; 8 – вторичная обмотка; 9 – обмотка управления; 10 – корректор напряжения; 11 – внешний источник постоянного тока; 12 – электронный ключ; 13 – трансформатор тока; 14 – шунт; 16 – АЦП; 17, 18 – регистр памяти; 19 – распределитель импульсов; 20 – генератор импульсов стабильной частоты; 21 – вычитатель; 22 – задающий регистр; 23 – компаратор; 24, 26 – дифференциатор; 25 – триггер; 27 – логический элемент ИЛИ; 28 – шина ПУСК; 29 – формирователь-ограничитель; 30 – инвертор; 31 – логический элемент И; 32 – резисторы; 33 – ключи

Автономные источники электрической энергии имеют ограниченную мощность [6, 14, 16, 18, 19]. В процессе эксплуатации может потребоваться питание потребителя соизмеримой с источником мощности. Для устранения провалов напряжения применяют устройства плавного пуска и преобразователи частоты. Однако стоимость устройств достаточно высока. Применение систем регулирования форсировки позволяет снизить затраты на систему электроснабжения [14].

Заключение

Таким образом, предложенная система возбуждения генератора имеет высокую форсировочную способность. Степень форсировки возбуждения является функцией максимального приращения тока нагрузки генератора, что обеспечивает высокое быстродействие и точность, исключая возможность перерегулирования. Точность форсировки определяется разрядностью компаратора 23 и количеством резисторов 32.

Повышение форсировочной способности САРВ синхронного генератора снижает величину и длительность провалов напряжения в динамических режимах и улучшает условия их включения на параллельную работу методом самосинхронизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А. П. Автоматическое управление судовыми электроэнергетическими установками / А. П. Баранов. М.: Транспорт, 1981. 255 с.
2. Баранов А. П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: учеб. для вузов / А. П. Баранов. М.: Транспорт, 1988. 328 с.
3. ГОСТ Р ИСО 8528-3-2005. Ч. 3. Генераторы переменного тока.
4. ГОСТ Р ИСО 8528-5-2005. Ч. 5. Электроагрегаты.

5. ГОСТ 22246–84. Дизель-генераторы судовые вспомогательные и аварийные.
6. Китаенко Г. И. Справочник судового электрика. Т. 1. Судовые электроэнергетические системы и устройства / Г. И. Китаенко. Л.: Судостроение, 1980. 923 с.
7. Российский речной регистр: Т. 2: Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания (ПСВП). Ч. IV. Электрическое оборудование, средства радиосвязи, навигационное оборудование. СПб., 2003.
8. Разработка и обоснование перспективных методов оценки показателей качества электрической энергии передвижных ИЭЭ: отчет о НИР (итогов.). Шифр «Проба-2» / КВИУИВ; инв. № 409-91. Калининград, 1991. 127 с.
9. Сергиенко Л. И. Электроэнергетические системы морских судов / Л. И. Сергиенко, В. В. Мионов. М.: Транспорт, 1991. 264 с.
10. Яковлев Г. С. Судовые электроэнергетические системы. Л.: Судостроение, 1987. 387 с.
11. Лукутин Б. В. Режимы работы синхронных и асинхронных генераторов микрогидроэлектростанций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Б. В. Лукутин. Екатеринбург, 1993. 38 с.
12. Вольдек А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
13. Брускин Д. Э. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. М.: Высш. шк., 1990. 528 с.
14. Сюбаев М. А. Эксплуатация судового электрооборудования / М. А. Сюбаев. СПб.: Изд-во ГМА им. адмирала С. О. Макарова, 2008. 46 с.
15. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
16. Ткаченко А. Н. Судовые системы автоматического управления и регулирования / А. Н. Ткаченко. Л.: Судостроение, 1984. 288 с.
17. Сугаков В. Г. Система возбуждения синхронного генератора с внешней форсировкой / В. Г. Сугаков, А. А. Тощев // Речной транспорт (XXI век). 2014. № 1 (66). С. 70–71.
18. Кузнецов С. Е. Основы технической эксплуатации судового электрооборудования и автоматики / С. Е. Кузнецов, В. С. Филев. СПб.: Судостроение, 1995. 448 с.
19. Самулев В. И. Судовые электроэнергетические системы: учеб. пособие / В. И. Самулев. Нижний Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2011. 444 с.

Статья поступила в редакцию 29.04.2015,
в окончательном варианте – 02.06.2015

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сугаков Валерий Геннадьевич – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта»; electrotech@vgavt-nn.ru.

Хватов Олег Станиславович – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта»; electrotech@vgavt-nn.ru.

Мальшев Юрий Сергеевич – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; канд. техн. наук; доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта»; elektrikasp@mail.ru.

Тощев Александр Александрович – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта»; electrotech@vgavt-nn.ru.

Сычушкин Иван Вячеславович – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; канд. техн. наук; доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта»; electrotech@vgavt-nn.ru.



V. G. Sugakov, O. S. Khvatov,
Yu. S. Malyshev, A. A. Toshchev, I. V. Sychushkin

EXTERNAL BOOST OF EXCITATION SYSTEMS OF MARINE SYNCHRONOUS GENERATORS

Abstract. The tasks assigned to the system of automatic voltage regulation (SAVR) and classification of SAVRs are considered. The analysis of the capabilities of existing SAVRs, in terms of performing the described tasks and quality assurance of the generated voltage is made; their advantages and disadvantages are examined. It is shown that the SAVRs used in modern industry generally ensures the reliability and quality of electricity supply. The operated SAVRs can be classified in a number of signs, the main of which are: the type of excitation system, the presence of the brush and contact assembly, the principle of regulation, the way to impact on excitation of synchronous generator, the type of characteristics and the presence of boost. The analysis of the existing SAVRs shows that the forcing ability of the excitation systems with internal boost is insufficient as excitation increases due to the internal resources of the excitation system, which is limited. In the systems with an external boost an increase in excitation is carried out by an external source, which resources can be more effective than when forcing the inner, and it can be arranged for the excitation system of any type of the synchronous generator. SAVR with uncontrollable external boost has high speed of boost of excitation and provides high speedup capacity, which is limited only by the parameters of the external source. The disadvantage of this system is the ability to over-excitation of the generator, since the excitation is increased always by the same amount, which is determined by the parameters of the external source. To avoid this drawback is possible due to SAVR with a controlled external boost. The degree of excitation forcing, which is a function of the maximum increment of the load current generator, provides high performance and accuracy, eliminating the possibility of overshoot. Besides increase in the forcing ability of SAVR of the synchronous generator reduces the magnitude and duration of voltage dips in the dynamic conditions and improves the conditions of their switching on the parallel operation using the method of self-synchronization.

Key words: system of automatic control of excitation, boost of excitation, synchronous generator, quality of voltage regulation.

REFERENCES

1. Baranov A. P. *Avtomaticheskoe upravlenie sudovymi elektroenergeticheskimi ustanovkami* [Automatic control of marine electric power plants]. Moscow, Transport Publ., 1981. 255 p.
2. Baranov A. P. *Sudovye avtomatizirovannye elektroenergeticheskie sistemy* [Marine automatic electric power systems]. Moscow, Transport Publ., 1988. 328 p.
3. *GOST R ISO 8528-3-2005. P. 3. Generatory peremennogo toka* [Alternating current generators].
4. *GOST R ISO 8528-5-2005. P.5. Elektroagregaty* [Electric generating sets].
5. *GOST 22246-84. Dizel'-generatory sudovye vspomogatel'nye i avariinnye* [Marine additional and emergent diesel generators].
6. Kitaenko G. I. *Spravochnik sudovogo elektriika. T. 1. Sudovye elektroenergeticheskie sistemy i ustroistva* [Reference of marine electric engineer. Vol. 1. Marine electric power systems and units]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1980. 923 p.
7. *Rossiiskii rechnoi registr: T. 2: Pravila klassifikatsii i postroiki sudov vnutrennego plavaniia (PSVP). Chast' IV: Elektricheskoe oborudovanie, sredstva radiosviasi, navigatsionnoe oborudovanie* [Russian river register: Vol. 2: Rules of classification and design of the vessels of domestic navigation. Part IV: Electric equipment, radio system, navigation equipment]. Saint-Petersburg, 2003.
8. *Razrabotka i obosnovanie perspektivnykh metodov otsenki pokazatelei kachestva elektricheskoi energii peredvizhnykh IEE: otchet o NIR (itogov.). Shifr «Proba-2»* [Development and explanation of the promising methods of evaluation of the qualitative parameters of the electric power of mobile EEI: report on scientific research work (final). Code "Probe-2"]. KVIUIV; inv. № 409-91. Kaliningrad, 1991. 127 p.
9. Sergienko L. I., Mironov V. V. *Elektroenergeticheskie sistemy morskikh sudov* [Electric power systems of marine vessels]. Moscow, Transport Publ., 1991. 264 p.
10. Iakovlev G. S. *Sudovye elektroenergeticheskie sistemy* [Marine electric power systems]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1987. 387 p.
11. Lukutin B. V. *Rezhimy raboty sinkhronnykh i asinkhronnykh generatorov mikrogidroelektrostantsii: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Modes of operations of synchronous and asynchronous generators of micro hydroelectric stations. Abstract of dis. Dr. tech. sci.]. Ekaterinburg, 1993. 38 p.

12. Vol'dek A. I., Popov V. V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electric machines. Machines of alternating current]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p.
13. Bruskin D. E., Zorokhovich A. E., Khvostov V. S. *Elektricheskie mashiny i mikromashiny* [Electric machines and micromachines]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1990. 528 p.
14. Siubaev M. A. *Ekspluatatsiia sudovogo elektrooborudovaniia* [Exploitation of marine electric power equipment]. Saint-Petersburg, Izdatel'stvo GMA imeni admirala S. O. Makarova, 2008. 46 p.
15. Zhezhelenko I. V., Saenko Iu. L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriiatiakh* [Qualitative parameters of the electric power and their control at the industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat, 2000. 252 p.
16. Tkachenko A. N. *Sudovye sistemy avtomaticheskogo upravleniia i regulirovaniia* [Marine automatic control and regulation systems]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1984. 288 p.
17. Sugakov V. G. Sistema vzbuzhdeniia sinkhronnogo generatora s vneshnei forsirovkoi [System of excitation of synchronous generator with external forcing]. *Rechnoi transport (XXI vek)*, 2014, no. 1 (66), pp. 70–71.
18. Kuznetsov S. E., Filev V. S. *Osnovy tekhnicheskoi ekspluatatsii sudovogo elektrooborudovaniia i avtomatiki* [The bases of the technical exploitation of marine electric power equipment and automatics]. Saint-Petersburg, Sudostroenie Publ., 1995. 448 p.
19. Samulev V. I. *Sudovye elektroenergeticheskie sistemy* [Marine electric power systems]. Nizhny Novgorod, Izdatel'stvo FGOU VPO «VGAVT», 2011. 444 p.

The article submitted to the editors 29.04.2015,
in the final version – 02.06.2015

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sugakov Valeriy Gennadyevich – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department "Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Facilities"; electrotech@vgavt-nn.ru.

Khvatov Oleg Stanislavovich – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department "Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Facilities"; electrotech@vgavt-nn.ru.

Malyshev Yuriy Sergeevich – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department "Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Facilities"; elektrikasp@mail.ru.

Toshchev Alexander Aleksandrovich – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Postgraduate Student of the Department "Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Facilities"; electrotech@vgavt-nn.ru.

Sychushkin Ivan Vyacheslavovich – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department "Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Facilities"; electrotech@vgavt-nn.ru.

