



PS5 – S2-09



## Мониторинг запасов устойчивости энергосистем на основе идентификации матрицы собственных и взаимных проводимостей ЭДС генераторов

А.Г. ФИШОВ, А.И. ДЕХТЕРЕВ, Д.В. ТУТУНДАЕВА  
Новосибирский государственный технический университет  
Россия  
[fishov@ngs.ru](mailto:fishov@ngs.ru)

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Установившийся режим, переходный режим, послеаварийный режим, статическая устойчивость режима энергосистемы, математическое моделирование режимов энергосистем, мониторинг устойчивости.

### 1 ВВЕДЕНИЕ

Предметом исследования является технология мониторинга статической устойчивости электроэнергетических систем, основанная на использовании данных синхронизированных измерений режимных параметров в узлах электрической сети.

По мере увеличения числа PMU в энергосистемах получаемые в результате синхронизированных измерений режимные параметры находят все большее применение при решении различных задач: верификации цифровых моделей энергосистем [1], повышении качества оценивания текущего режима, мониторинга переходных процессов и участия энергоблоков в регулировании и др.

Настоящая работа посвящена исследованию возможностей и особенностей мониторинга в реальном времени предельных выдаваемых мощностей и запасов статической устойчивости режимов электростанций, работающих в составе ЭЭС.

Синхронизированные распределенные измерения (регистрации переходных процессов) режимных параметров, включая векторы напряжения в узлах сети, создают техническую возможность реализации технологии контроля допустимости режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) [2]. Содержащаяся в них информация о взаимном движении роторов синхронных машин в переходном процессе позволяет сформировать модель для учета ограничений по устойчивости режима ЭС, соответствующую текущим режимным условиям и актуальной топологии электрической сети без ее контроля и использовать модель в задачах оперативного и автоматического противоаварийного управления.

### 2 МОДЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЖИМА ЭС

Представим ЭЭС в текущий момент времени пассивным линейным многополюсником с активными узлами, соответствующими узлам приложения ЭДС генераторов. Нагрузки, замещаемые линейными шунтовыми элементами, учтем в составе пассивного многополюсника. Этому многополюснику соответствует квадратная матрица собственных и взаимных проводимостей (СВП) ЭДС генераторов ( $Y$ ).

Режим  $n$  генераторов описывает система уравнений [3]:

$$\underline{S} = \text{diag}\{\dot{\underline{E}}\} \cdot \underline{Y}^* \cdot \dot{\underline{E}}^* \quad (1)$$

где  $\underline{S}$  – матрица внутренних мощностей генераторов в точках приложения ЭДС;

$\dot{\underline{E}}$  – матрица векторов ЭДС генераторов.

Режим каждого из генераторов определяется выражением

$$\underline{S}_i = \dot{E}_i \sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^* \dot{E}_j^* \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

где  $i$  и  $j$  – индексы, указывающие номера генераторов в схеме;

$S_i$  – внутренняя мощность  $i$ -го генератора;

$\dot{E}_i$ ,  $Y_{ij}$  и  $\underline{Y}_{ij}$  – элементы матриц  $\dot{\underline{E}}$  и  $\underline{Y}$ .

Уравнение (3) можно записать в виде:

$$\underline{S}_i = \dot{E}_i \cdot (\dot{\underline{E}}^*)^T \cdot \underline{y}^{(i)*} \quad (3)$$

где  $\underline{y}^{(i)}$  – матрица-столбец (вектор) СВП  $i$ -го генератора, соответствующая  $i$ -й строке матрицы  $\underline{Y}$ .

Записав уравнения (4) для  $n-1$  генератора, получим систему линейно независимых уравнений относительно вектора СВП генераторов  $\underline{y}$ , который получается путем объединения векторов  $\underline{y}^{(i)}$ :

$$\underline{S} = \underline{A} \cdot \underline{y}^* \quad (4)$$

Вектор СВП  $\underline{y}$  с учетом симметрии матрицы  $\underline{Y}$  ( $Y_{ij} = Y_{ji}$ ) имеет размерность  $(n^2 + n)/2$  или  $(n^2 + n - 2)/2$ , если один из узлов генерации принимается шинами бесконечной мощности (ШБМ).

В электрической схеме с  $n$  генераторами число неизвестных значений вектора СВП больше числа независимых уравнений (5), за исключением случая работы генератора без собственной нагрузки на ШБМ. Для того чтобы система уравнений (5) стала определенной, уравнения мощностей генераторов можно дополнить, используя измерения для разных моментов времени переходного электромеханического процесса или квазиустановившихся режимов.

В отличие от подробной цифровой модели ЭС, обычно используемой при расчетах установившихся и переходных режимов, матрица СВП ЭДС генераторов имеет меньший порядок, при ее получении (идентификации) исключено влияние таких факторов, как ошибки средств телемеханики и недостоверность баз данных по оборудованию ЭЭС. Порядок матрицы (структура идентифицируемой модели) и погрешность определения ее параметров напрямую зависят от характера и интенсивности взаимных движений роторов генераторов, т.к. для генераторов с синфазно движущимися роторами идентификация взаимных проводимостей невозможна в силу вырожденности матрицы  $\underline{A}$ .

Идентификация модели режима ЭС, заданной матрицей СВП ЭДС генераторов, заключается в решении системы уравнений (5) относительно  $\underline{y}$ , при этом векторы ЭДС генераторов для каждого момента времени получают расчетным путем на основе регистрограмм напряжения и мощностей на шинах генераторов с учетом падений напряжения на соответствующих сопротивлениях генераторов.

«Окно идентификации» – интервал времени, для которого характерна стабильность идентификации значений матрицы СВП – составляет, как правило, 1-3 секунды электромеханического переходного процесса в послеаварийном состоянии схемы. Выбор оптимального интервала идентификации и сглаживание результатов позволяет обеспечить стабильность и снизить погрешность идентификации.

Условия идентифицируемости актуальной матрицы СВП можно выполнить на основе одного из принципов:

- использования регистрограмм процессов при возникновении спорадических возмущений нормального режима ЭС в результате воздействия аварийных возмущений. В этом случае область применения рассмотренной модели режима ЭС – контроль допустимости квазиустановившихся и установившихся послеаварийных режимов (ПАР).
- использования искусственного возмущения режима, например, путем подачи специальных (зондирующих) импульсов для разгрузки турбин. В этом случае может быть обеспечен контроль допустимости нормальных режимов.

### 3 МОНИТОРИНГ ДОПУСТИМОСТИ РЕЖИМОВ ЭЭС

#### 3.1 Исследование на математических моделях

Исследование проводилось для ЭЭС, представленной на рис.2.

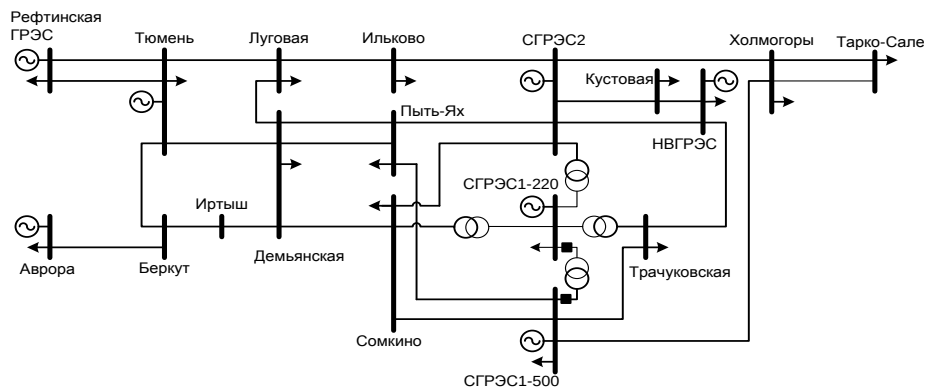


Рис. 1: Схема энергосистемы

По программе «Мустанг» проводились расчеты переходных процессов с получением расчетных осциллограмм режимных параметров на шинах электростанций с использованием различных моделей нагрузки и генераторов (нерегулируемая ЭЭС, модель генератора  $E' = \text{const}$ ; нерегулируемая ЭЭС, модель генератора - упрощенные уравнения Парка-Горева; регулируемая ЭЭС с АРВ пропорционального действия; регулируемая ЭЭС с АРВ сильного действия).

Обработка расчетных осциллограмм переходных процессов, процедура идентификации матрицы СВП, контроль предельных мощностей и ограничений по статической устойчивости ПАР производились по специальной программе, реализованной в «Mathcad».

По результатам расчета переходных процессов выполнялись идентификация актуальной матрицы СВП для 3-х узлового эквивалента ЭЭС, расчет предельной мощности одного из генераторов с учетом изменения мощности других, используя аналитические выражения для угловых характеристик мощностей генераторов:

$$P_i = E_i^2 g_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (E_i E_j b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - E_i E_j g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (5)$$

где  $P_i$  – активная мощность генератора;  $E_i$  – модуль вектора ЭДС генератора;  $g_{ii}$  и  $g_{ij}$ ,  $b_{ij}$  – соответственно активные и реактивная составляющие СВП генераторов;  $\delta_i$  и  $\delta_j$  - углы векторов ЭДС генераторов относительно вектора напряжения ШБМ.

На рис. 2 приведены графики изменения выдаваемых активных мощностей генераторов и предельная мощность первого генератора в переходном процессе в сравнении с результатом утяжеления режима, полученного по программе «Мустанг». Утяжеление выполнено путем увеличения мощности одного из генераторов при постоянной мощности других, соответствующей их загрузке в установившемся ПАР. Предельная мощность генератора в переходном режиме определялась при условии неизменности углов остальных.

Величина переходной ЭДС в каждый момент времени принималась равной своему текущему значению. В расчете использованы усредненные значения СВП на интервале, соответствующем окну идентификации. Аварийное возмущение выбиралось предельным по

условию сохранения динамической устойчивости для того, чтобы зафиксировать максимум угловой характеристики активной мощности генератора в переходном процессе.

Для учета работы АРВ и ограничений по току возбуждения была реализована процедура утяжеления режима в модели режима ЭЭС, заданной актуальной матрицей СВП. Для этого на каждом шаге утяжеления производилось совместное решение уравнений установившегося режима и уравнений, задающих связь между модулями векторов ЭДС и напряжениями на шинах генераторов:

$$E_i = \sqrt{\left( U_{Gi} + \frac{Q_{Gi} \cdot x_{Gi}}{U_{Gi}} \right)^2 + \left( \frac{P_{Gi} \cdot x_{Gi}}{U_{Gi}} \right)^2} \quad (6)$$

Как видно из рис. 2, предельная мощность генератора – величина переменная, изменение которой в переходном процессе обусловлено несколькими факторами: изменениями переходной ЭДС генератора, влиянием демпферного момента, работой АРВ и взаимозависимостью предельных мощностей генераторов.

После затухания электромеханического переходного процесса и по завершении работы систем регулирования предельные мощности генераторов должны установиться к значениям, соответствующим условиям поддержания постоянного напряжения на шинах генераторов с учетом располагаемой реактивной мощности, т.е. к тем значениям, что найдены путем утяжеления режима традиционным методом.

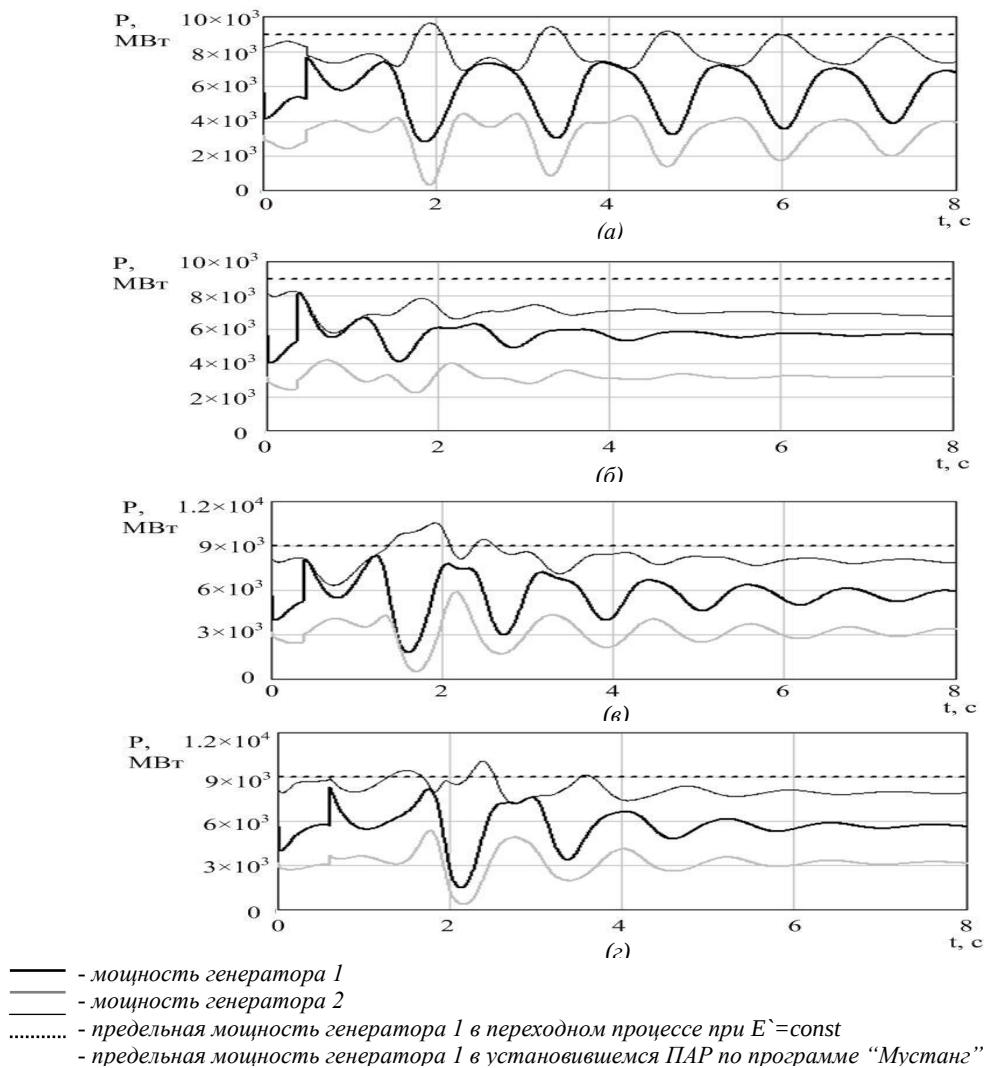


**Рис. 2:** Сравнение предельных мощностей в переходном режиме и по статической устойчивости в установившемся ПАР для 3-х узловых эквивалента схемы

(а) – нерегулируемая ЭЭС, модель генератора  $E' = \text{const}$ ; (б) – нерегулируемая ЭЭС, упрощенные уравнения Парка-Горева; (в) – с АРВ пропорционального действия, (г) – с АРВ сильного действия.

В таблице 1 для сопоставления представлены результаты утяжеления режима с учетом работы АРВ и ограничений по реактивной мощности по модели режима ЭЭС, заданной матрицей СВП, и результатов расчета предельных мощностей генераторов по программе «Мустанг». Помимо предельных мощностей в таблицах указана погрешность вычисления предела по отношению к результату утяжеления режима в программе «Мустанг».

| Генератор | Пределы, полученные путем утяжеления режима в программе Мустанг, МВт |                                                                  | Пределы, полученные путем утяжеления режима с использованием результатов идентификации актуальной матрицы СВП ЭДС генераторов, МВт и относительная погрешность определения предела, % |                               |                                                                  |                               |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
|           | При условии $U_g = \text{const}$                                     | При условии $U_g = \text{const}$ и с учетом ограничения по $Q_g$ | При условии $U_g = \text{const}$                                                                                                                                                      |                               | При условии $U_g = \text{const}$ и с учетом ограничения по $Q_g$ |                               |
|           |                                                                      |                                                                  | Интервал усреднения СВП - 2 с                                                                                                                                                         | Интервал усреднения СВП - 6 с | Интервал усреднения СВП - 2 с                                    | Интервал усреднения СВП - 6 с |
| 1         | 11005                                                                | 8981                                                             | $\frac{11154}{1.35}$                                                                                                                                                                  | $\frac{11024}{0.17}$          | $\frac{9048}{0.74}$                                              | $\frac{8964}{0.19}$           |
| 2         | 8507                                                                 | 6503                                                             | $\frac{8663}{1.84}$                                                                                                                                                                   | $\frac{8549}{0.50}$           | $\frac{6572}{1.06}$                                              | $\frac{6453}{0.77}$           |

**Табл. 1:** Сравнение пределов по статической устойчивости в установившемся ПАР

Источник погрешности определения предела на основе актуальной матрицы СВП – линейное представление нагрузки, которая учтена в матрице СВП постоянной проводимостью. Влияние модели нагрузки на точность расчета предела наиболее существенно в режимах с пониженным напряжением.

Интервал усреднения величин СВП ЭДС генераторов также оказывает влияние на погрешность определения предела: с увеличением этого интервала, при условии стабильности значений матрицы СВП, точность расчета предела возрастает. Как следует из таблицы 1, при увеличении интервала усреднения до 6 секунд погрешность в оценке предела не превышает 1%.

Модель для контроля ограничений по статической устойчивости режима ЭС на основе актуальной матрицы СВП может быть адаптирована к различным стадиям ПАР ЭС [4], а результаты мониторинга допустимости квазиустановившихся и установившихся ПАР могут быть использованы для корректировки управляющих воздействий ПА в темпе переходного процесса с учетом текущих схемно-режимных условий и фактических аварийных возмущений.

Мониторинг допустимости режимов ЭС предполагает контроль запасов статической устойчивости в координатах узловых мощностей генераторов, что имеет следующие преимущества:

- независимость от структуры сети, так как отсутствует привязка к определенным сечениям схемы;
- информативность, так как структура матрицы СВП позволяет выделить синфазно движущиеся группы генераторов, в отношении которых существует угроза нарушения устойчивости, и определить вектор утяжеления режима;
- универсальность – возможен контроль запасов устойчивости как в системообразующей сети, так и в сетях с распределенной генерацией;
- возможность использования в контуре управления мощностью генераторов (например, для определения уровня и темпа при длительной разгрузке турбин);
- отсутствует необходимость в тотальном оснащении ЭС средствами измерения, достаточно установить регистраторы только на шинах станций.

Помимо контроля ограничений по статической устойчивости мониторинг допустимости режимов ЭС также может включать контроль запасов по напряжению в узлах нагрузки [5] и контроль допустимых перетоков по сечениям. Для этого необходимо выполнить идентификацию коэффициентов связи ЭДС генераторов с соответствующими контролируемыми параметрами, что потребует установить регистраторы СМРР на узловых подстанциях, представляющих интерес с точки зрения устойчивости нагрузки, с линиями, входящими в состав контролируемых сечений.

### 3.2 Исследование на физических моделях ЭЭС

Проверка достоверности полученных результатов проводилась на физических моделях (НГТУ(а), НИИПТ (б)) для схем, представленных на рисунке 6.

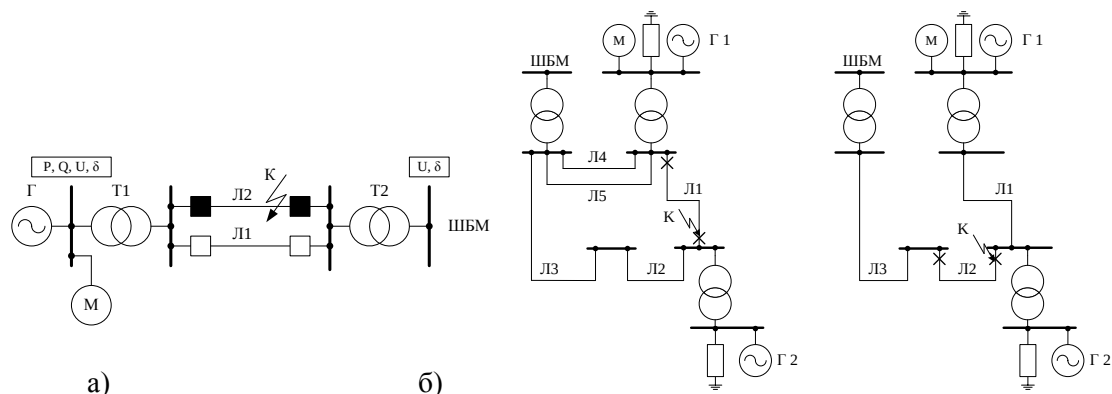


**Рис. 6:** Схемы ЭЭС, используемые при экспериментальных исследования на физических моделях

Запись мгновенных значений токов и напряжений выполнялась с частотой дискретизации 2400 кГц. Расчет активных и реактивных мощностей генераторов, действующих значений напряжений и взаимных углов выполнялся с дискретностью 30 мс.

Изменения режимных параметров в темпе электромеханического процесса для простейшей схемы электропередачи, представленной на рисунке 8а, при двухфазном КЗ в начале линии Л2 приведено на рисунке 7б.

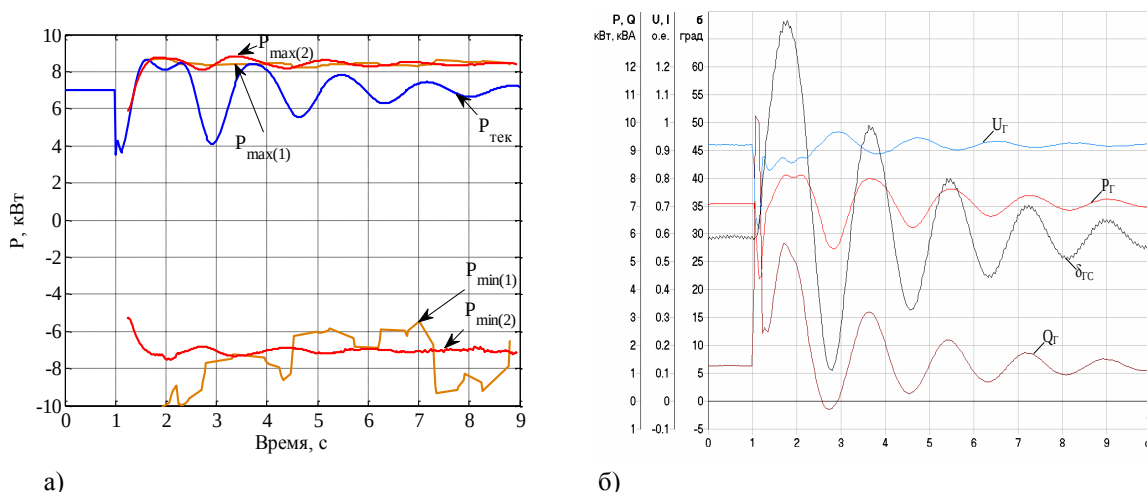


**Рис. 7:** Результаты мониторинга предельного режима генератора 7(а) в схеме 6(б) и регистрограмма исходного переходного процесса 7(б).

$P_{тек}$  - текущая мощность генератора, ( $P_{max}$ ,  $P_{min}$ ) - оценка пределов выдаваемой и «потребляемой» мощности по результатам расчетных (1) и экспериментальных (2) регистрограмм процессов.

Результаты оценки пределов выдаваемых мощностей, полученных методом утяжеления режима и на основе матриц СВП по данным физических экспериментов для двухмашинных схем рис. 6(б) приведены в таблице 2.

|                                              | Метод утяжеления | На основе матрицы СВП |          |
|----------------------------------------------|------------------|-----------------------|----------|
|                                              |                  | 1 случай              | 2 случай |
| Схема, представленная на рисунке 6(б) левая  |                  |                       |          |
| $P_{\max}$ , кВт                             | 4,7              | 4,57                  | 4,60     |
| $P_{\min}$ , кВт                             | -                | -0,60                 | -0,93    |
| Схема, представленная на рисунке 6(б) правая |                  |                       |          |
| $P_{\max}$ , кВт                             | 7,45             | 7,40                  | 7,46     |

|                  | Метод утяжеления | На основе матрицы СВП |          |
|------------------|------------------|-----------------------|----------|
|                  |                  | 1 случай              | 2 случай |
| $P_{\min}$ , кВт | 1,82             | 1,63                  | 1,32     |

**Табл. 2:** Пределы выдаваемой мощности генератора по данным физического эксперимента (схема представлена на рисунках 13)

#### 4 ВЫВОДЫ

1. Идентификация актуальной матрицы СВП ЭДС генераторов на основе измерений СМПР позволяет сформировать модель режима ЭС для мониторинга устойчивости и допустимости режимов ЭЭС.
2. Результаты экспериментов подтверждают возможность идентификации матрицы СВП и контроля устойчивости в темпе электромеханического переходного процесса в условиях близких к реальным (двигательная нагрузка).
3. Создание системы мониторинга допустимости режимов ЭС позволит осуществить переход от управления режимами по принципу “ДО” на основе заранее выполненных расчетов устойчивости для ограниченного набора расчетных условий к управлению по принципу “ПОСЛЕ” по факту возникновения аварийного возмущения.
4. Результаты мониторинга допустимости режимов ЭС могут быть использованы для корректировки ограничений на режимы ЭС, необходимых величин управляющих воздействий ПА в темпе переходного процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аюев Б.И. Система мониторинга переходных режимов: текущее состояние и перспективы развития [Электронный ресурс] // Мониторинг параметров электроэнергетической системы: материалы второй международной науч.-практич. конф., Санкт-Петербург, 28-30 апр. 2008 г. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
- [2] Фишов А.Г. Мониторинг запасов устойчивости энергосистем по данным СМПР с идентификацией и использованием собственных и взаимных проводимостей ЭДС эквивалентных генераторов / А.Г. Фишов // Электроэнергетика глазами молодежи : научные труды всероссийской научно-технической конференции, Екатеринбург 17-19 ноября 2010 года : сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2010. Т. 1. С. 24-27
- [3] Жуков Л.А. Установившиеся режимы сложных электрических систем: Методы расчетов [Текст] / Л.А. Жуков, И.П. Стратан – М.: Энергия, 1979.
- [4] Лукашов Э.С. Длительные переходные процессы в энергетических системах [Текст] / Э.С. Лукашов, А.Х. Калюжный, Н. Н. Лизалек. – Новосибирск: Наука, 1985.
- [5] Тутундаева Д.В. Мониторинг запасов статической устойчивости энергосистемы с контролем напряжения на шинах нагрузки / Д.В. Тутундаева, А.Г. Фишов // Электроэнергетика глазами молодежи : научные труды всероссийской научно-технической конференции, Екатеринбург, 17-19 ноября 2010 года : сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2010. Т. 1. С. 194-199.