

УДК 621.397.13.08-028.77

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.01

**А.В. Панкратов¹, Н.Л. Бацева², А.К. Жуйков²,
А.А. Шувалова³, М.А. Кондрашов⁴**

¹АО «Системный оператор Единой энергетической системы», Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

³Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
Барнаул, Россия

⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ ОПЕРАТИВНО- ИНФОРМАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ МЕТОДОМ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

При управлении режимами работы электроэнергетических систем применяются верифицированные математические модели, которые строятся на основе информации о технических характеристиках оборудования и измеренных параметрах электроэнергетического режима. Для уточнения и актуализации параметров электрической нагрузки проводят специальные системные эксперименты с принудительным изменением напряжения в узле нагрузки. Такие эксперименты называются активными экспериментами. Несмотря на накопленный опыт проведения активных экспериментов, единая общая методика обработки данных пока не создана. Это связано с трудностями учёта и описания особенностей поведения электрической нагрузки; использования средств измерения; проведения активного эксперимента. Тем не менее, обработка данных, полученных в активном эксперименте, всегда включает в себя общие этапы, направленные на решение исследовательских задач. **Цель исследования:** обобщение опыта обработки телеизмерений, полученных из оперативно-информационного комплекса при проведении активного эксперимента, и автоматизация процессов обработки телеизмерений. **Методы:** для анализа телеизмерений, полученных из оперативно-информационного комплекса, и построения зависимостей активной и реактивной мощностей от напряжения разработан метод приведения телеизмерений к общей оси времени, который позволяет привести телеизмерения к общей оси времени без прореживания телеизмерений и потери возможности определения их фактического интервала регистрации. При определении полиномиальной или линейной модели статической характеристики нагрузки для групп телеизмерений, а также для получения итоговых статических характеристик нагрузки использован метод наименьших квадратов. **Результаты:** в статье предложено пошаговое описание сложившейся на сегодняшний день методики обработки телеизмерений применительно к задаче определения статических характеристик нагрузки по напряжению. Разработаны пользовательские функции, автоматизирующие процесс обработки данных, что приводит к сокращению времени процесса обработки. **Практическая значимость:** не претендуя на исчерпывающий характер предлагаемой методики, авторы считают, что статья будет полезна для научных и инженерных работников, занимающихся определением статических характеристик нагрузки, а также решением схожих задач, в качестве обмена опытом и шага в направлении разработки нормативной документации.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, статические характеристики нагрузки по напряжению, активный эксперимент, оперативно-информационный комплекс, обработка телеизмерений.

**A.V. Pankratov¹, N.L. Batseva², A.K. Zhuykov²,
A.A. Shuvalova³, M.A. Kondrashov⁴**

¹Stock company "System Operator of the Unified Power System",
Tomsk, Russian Federation

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

³Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

⁴Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Sankt-Petersburg, Russian Federation

PROCESSING TECHNIQUE OF TELEMETRY FROM AN OPERATIVE-INFORMATION COMPLEX FOR THE IDENTIFICATION OF STATIC LOAD CHARACTERISTICS BY AN ACTIVE EXPERIMENT

Verified mathematical models based on information about equipment technical characteristics and measured mode parameters are utilized for a mode control of power systems. Special-purpose experiments with a forced-feed adjustment of a voltage value at a load bus are carried out for the refinement and updating power load parameters. These experiments are known as active experiments. Despite best practices in the sphere of the realization of active experiments, a processing technique of data is un-caused. This fact, mainly, connects with difficulties of a verification of characteristic properties of a power load; using measuring devices; carrying out an active experiment. Nevertheless, a processing technique of data, collected during an active experiment, comprises general stages directed to solutions of research tasks. **Purpose:** the aggregation of the processing experience for telemetry collected from an operative-information complex during an active experiment and the automation of the processing technique of telemetry. **Methods:** the technique of putting remote measurements, collected from an operative-information complex, in the common axis is developed. This technique serves for remote measurements evaluation and plotting active and reactive power's dependencies from voltage values. The main advantages of the technique are that remote measurements are put in the common axis without decimation and a lost opportunity of their real recorded interval identification. The least-squares method is applied for the identification of a polynomial or a linear model of a static load characteristic for a group of measurements and, also, for taking aggregated static load characteristics. **Results:** to this date, the processing technique of data is formed. In this paper we present its step-typed description with regard to the identification of static load characteristics. We, also, give the recommendations and describe the approaches to an automation of data processing. It thins out of data processing time. **Practical relevance:** we are not intended to exhaustive composition of the technique, but we consider that this paper is relevant for researchers and engineers, specializing in the identification of static load characteristics or for solving similar tasks. This paper is sharing of exchanges and a step to the direction of the normative documentation development.

Keywords: power system, static load-voltage characteristics, active experiment, operative-information complex, processing technique of telemetry.

Введение

В рамках цифровой трансформации отраслей топливно-энергетического комплекса важную роль играют автоматизация обработки и использования информации и создание универсальных систем информационного обмена [1, 2]. Сегодня невозможно представить ре-

шение задач оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике без применения специализированного программного обеспечения. На всех этапах планирования и управления электроэнергетическим режимом используются верифицированные расчетные модели энергосистем [3, 4]. Для их построения необходимо моделирование каждого отдельного элемента, входящего в состав энергосистемы: объектов по производству электрической энергии [5]; электросетевого хозяйства; энергопринимающих установок потребителей.

При этом наибольшую неопределенность в силу высокой размерности, распределённости и многообразия вносят электрические нагрузки. Промышленные программные комплексы позволяют их учитывать при помощи статических характеристик нагрузки (СХН) по напряжению, однако достоверная информация о виде СХН для каждого конкретного узла нагрузки, как правило, отсутствует.

В понятие нагрузки входит потребление активной и реактивной мощностей электроприёмниками объекта или района, включая потери в электрических сетях [6]. Статические характеристики нагрузки отражают зависимости активной P и реактивной Q мощностей, потребляемых в узле нагрузки, от напряжения U и частоты f . Определение, уточнение и использование СХН являются актуальной задачей и в последние годы привлекают всё большее внимание исследователей [7–9].

Данные для определения модели нагрузки получают с помощью активного и/или пассивного эксперимента [10]. Наибольшее внимание исследователи уделяют применению активного эксперимента [11–15]. Это объясняется тем, что широкий диапазон изменения напряжения и относительно малый временной интервал проведения активного эксперимента позволяют достичь максимальной точности при определении СХН.

Несмотря на большое количество работ, посвященных обработке данных активного эксперимента, единой пошаговой методики до настоящего времени не существует. Каждый отдельный случай определения СХН имеет ряд особенностей, требующих адаптации существующих подходов. Это связано с отличием в применяемых средствах измерения, которые позволяют получить данные разного качества, а также в различиях характера нагрузки и её поведения во время проведения активного эксперимента.

В статье обобщен опыт экспериментальных исследований по определению СХН по напряжению для крупных промышленных потребителей объединенной энергосистемы Сибири, проведенных авторами в период 2013–2021 гг. Акцент сделан на технические особенности выгрузки и обработки телеизмерений (ТИ), полученных из оперативно-информационного комплекса (ОИК) при проведении активного эксперимента.

1. Оперативно-информационный комплекс

Существует несколько способов получения измеренных значений параметров электроэнергетического режима: проведение измерений с помощью переносных регистрирующих приборов-анализаторов качества электрической энергии в электроустановках потребителей, использование данных из автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП), автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) или оперативно-информационного комплекса. Опыт показывает, что требуемым качеством обладают только данные, полученные с помощью анализаторов качества электрической энергии и ОИК. Данные АСУ ТП имеют недостаточную глубину хранения архива, а данные АСКУЭ – недостаточную частоту регистрации. Применение приборов-анализаторов не всегда возможно и оправданно. Во-первых, для их подключения необходимо получение доступа на объект и допуска для проведения работ. Во-вторых, один прибор позволяет проводить измерения только на одном присоединении, а при проведении активного эксперимента измерения необходимо проводить одновременно на всех исследуемых присоединениях. Таким образом, оптимальным способом получения данных является использование ТИ из ОИК.

Согласно [16], оперативно-информационный комплекс – это программно-аппаратный комплекс, предназначенный для хранения справочной информации, краткосрочного планирования режимов энергетической системы (единой, объединенной, региональной), получения данных о текущем режиме, обработки, архивирования поступающей информации и выдачи оперативному персоналу справочной информации, всех изменений режима, состояния оборудования и аварийно-предупредительных сообщений в темпе поступления информации, а также ретроспективно. Наиболее широкое распространение в Единой энергетической системе России получил ОИК СК-2007 производства АО «Монитор Электрик», г. Пятигорск [17]. Сегодня ему на смену

приходит ОИК СК-11 того же производителя. Однако источником ТИ для СК-11 по-прежнему остается СК-2007, поэтому процедуру получения данных рассмотрим на его примере.

Аппаратная часть ОИК представлена серверами, которые подключены к локальной вычислительной сети (ЛВС). К ЛВС также подключены серверы телемеханики и/или конвертеры протоколов, которые имеют связь с сетями сбора и передачи данных. ОИК не выполняет приём данных непосредственно из каналов телемеханики и обработку телемеханических протоколов, но может самостоятельно опрашивать измерительные устройства. Предусмотрено несколько вариантов обмена данными с системами сбора информации: напрямую с измерителями и устройствами телемеханики, серверами телемеханики или конвертерами протоколов, которые принимают информацию из каналов телемеханики; с помощью межмашинного обмена с удалёнными центрами управления.

Клиенты работают на выделенных рабочих станциях и могут подключаться к серверам при помощи вычислительных сетей.

2. Выгрузка ТИ из ОИК и структура хранения данных

На первом этапе необходимо определить, какие именно режимные параметры следует выгружать из ОИК. Для определения СХН необходимы значения активной, реактивной мощностей нагрузки и напряжения в точке присоединения. В зависимости от специфики задачи этот перечень может быть значительно расширен:

1. Мощность нагрузки зависит не только от напряжения, но и от частоты электрического тока, поэтому для анализа результатов активного эксперимента необходимо проводить оценку изменения частоты, для чего из ОИК выгружают её значения;

2. Нагрузка и режим сети могут иметь существенную несимметрию. В этом случае выгружают значения фазных и линейных напряжений, фазных токов и мощностей;

3. Непосредственные измерения мощностей нагрузки или напряжения в точке присоединения могут отсутствовать или иметь недостаточное качество. В этом случае недостающие параметры могут быть определены и/или верифицированы с помощью дорасчётов. Для проведения дорасчётов требуются параметры смежных присоединений и смежных объектов электроэнергетики.

Для выбора выгружаемых ТИ используют перечни ТИ, поступающих с исследуемого и смежных объектов. Перечень ТИ определяет соответствие измеренных значений физическим параметрам и содержит: номер ТИ, наименование ТИ и наименование канала телемеханики (ТМ), по которому ТИ поступило. Номер ТИ однозначно определяет ТИ в рамках ОИК, поэтому итогом выбора является список номеров выбранных ТИ.

При выборе ТИ рекомендуется заранее предусмотреть, какие из них могут понадобиться, и выгружать их с некоторым запасом. Это связано с двумя причинами:

1) политика хранения ТИ в архиве может предусматривать их прореживание через некоторый период времени после регистрации, что приведёт к безвозвратной потере невыгруженных ТИ;

2) при выгрузке дополнительного набора ТИ все описываемые ниже процедуры должны быть проделаны вновь, что приведёт к дополнительным трудовым и временным затратам.

Для выгрузки данных из ОИК СК-2007 в файлы формата *.csv используют стандартное программное обеспечение (ПО) СК-2007 «Анализ данных». При выполнении запроса для получения из ОИК максимально полного состава имеющейся информации следует использовать следующие настройки:

1. Формат представления значений измерений междуфазных напряжений, трехфазных активной и реактивной мощностей задать в режиме «Заданный, знаков после запятой», указав настройку «5» знаков после запятой.

2. Задать время выборки, используя режим выборки «В интервале». Шаг времени задать равным «0», тогда из базы данных реального времени (БДРВ) будут выбраны все значения ТИ, фактически поступившие в ОИК.

3. На инструментальной панели программы «Анализ данных» включить опцию «Время рождения» для вывода информации о метке времени рождения ТИ и включить опцию «Время с миллисекундами».

Помимо ПО «Анализ данных» ОИК СК-2007 предоставляет средства для выполнения запросов данных из БДРВ посредством собственного программного интерфейса приложения (API) либо с использованием механизмов БДРВ – Microsoft SQL Server. Использование таких

методов доступа к ТИ позволяет автоматизировать работы по выгрузке большого объёма ТИ по значительному количеству параметров.

Экспериментальные данные представляют собой массивы параметров режима в зависимости от времени и могут быть экспортированы в электронные *.csv-файлы. Кроме значений режимных параметров *.csv-файл содержит идентификационный номер (ID), под которым ТИ зарегистрировано в ОИК, метку времени рождения и метку времени поступления в ОИК, а также код качества. Код качества указывает на источник происхождения ТИ. Кроме непосредственно телеметрии источником могут быть расчёт, ручной ввод, повтор предыдущего значения и т.д. В дальнейшем при обработке все ТИ с кодом качества, отличным от «0x100 Источник: телеметрия», отфильтровываются. Фрагмент *.csv-файла приведен в табл. 1.

Таблица 1

Фрагмент *.csv-файла с ТИ из ОИК

Номер ТИ	Метка времени поступления в ОИК	Параметр режима	Код качества	Метка времени рождения
17840	2017-10-07 09:59:56.490	23,46446	0x100	2017-10-07 09:59:56.490
17840	2017-10-07 10:00:06.553	23,65715	0x100	2017-10-07 10:00:06.553
17840	2017-10-07 10:00:07.537	23,68576	0x100	2017-10-07 10:00:07.537
17840	2017-10-07 10:00:22.303	23,99172	0x100	2017-10-07 10:00:22.303

По мере увеличения количества исследуемых присоединений и объёма обрабатываемой информации автоматизация обработки ТИ играет все более важную роль. В целях автоматизации обработки больших массивов ТИ целесообразно использовать существующие пакеты прикладных программ. Рассмотрим обработку ТИ с использованием MatLab. Выбор программного пакета и языка программирования MatLab в первую очередь обусловлен его направленностью на работу со структурами данных, основанными на матрицах. В дальнейшем будем использовать терминологию и типы данных, применяемые в MatLab.

Выгруженные из ОИК данные сохраняют в таблице DATA, содержащей переменные: NTI – номер ТИ (double), TIME – метка времени (datetime), VALUE – значение ТИ (double), CODE – код качества (double). Здесь и далее в скобках указаны типы данных. Для автоматизации экспорта из *.csv-файлов в таблицу DATA полезно разработать пользовательскую функцию. Вид DATA приведен в табл. 2.

Таблица 2

Вид таблицы DATA

NTI	TIME	VALUE	CODE
16945	2018-10-20 23:58:59.483	-15,6830520629883	100
16945	2018-10-20 23:59:59.630	-14,8554105758667	100
16946	2018-10-19 23:59:45.937	-9,36376667022705	100
16946	2018-10-20 00:00:46.050	-9,66829109191895	100

В качестве значений переменной TIME используют метки времени поступления в ОИК либо метки времени рождения ТИ. В таблицу DATA последовательно добавляют все выгруженные ТИ всех измеряемых параметров. Перечень ТИ сохраняют в таблице mainLIST, содержащей следующие переменные: TI_Num – номер ТИ (double), num_in_NOM – номер ТИ в векторе NOM (double), Object – объект, с которого получено ТИ (string), Feeder – наименование присоединения (string), Par – измеряемый параметр – напряжение, ток, активная и реактивная мощности, частота, температура и т.д. (string), Ret – инверсия (double), Channel – канал, по которому получено ТИ (string). Вид mainLIST приведен в табл. 3.

Таблица 3

Вид таблицы mainLIST

TI_Num	num_in_NOM	Object	Feeder	Par	Ret	Channel
9489	1	ПС-1	1СШ 220 кВ	<i>U</i>	1	основной
9484	2	ПС-1	ВЛ-1	<i>P</i>	-1	основной
9478	3	ПС-1	ВЛ-1	<i>Q</i>	-1	основной

Переменная Ret принимает значения +1 и -1 и служит для изменения направления перетока в случае необходимости. Вектор NOM (cell array of double) содержит номера строк таблицы DATA, соответствующие данному ТИ. Для формирования вектора NOM целесообразно написать пользовательскую функцию. В дальнейшем, например, зна-

чения ТИ напряжения на 1СШ 220 кВ с номером 9489 можно получить с помощью команды DATA.VALUE(NOM{1}), а соответствующие метки времени – с помощью команды DATA.TIME(NOM{1}).

3. Оценка пригодности телеизмерений

Для определения СХН ТИ напряжения и мощностей должны обладать достаточным качеством. Поэтому до проведения активного эксперимента необходимо заранее получить перечень ТИ и *.csv-файлы по исследуемым присоединениям за определённый период времени, чтобы оценить пригодность ТИ для определения СХН по напряжению и устранить выявленные недостатки.

Помимо информации, представленной в таблице mainLIST, в целях оценки качества ТИ рекомендуется рассчитать и представить в виде таблицы LIST следующие параметры ТИ: Begin – метка времени первого измерения (datetime), Duration – продолжительность записи (duration), End – метка времени последнего измерения (datetime), N – количество измерений (double), DT=Duration/N – средний интервал регистрации (duration), MIN, MEAN и MAX – минимальное, среднее и максимальное значения ТИ соответственно (double), CODE – коды качества ТИ и количество измерений с данным кодом качества (string).

В примере, приведенном в табл. 4, встречаются следующие коды качества ТИ: 8 – «недостоверность подлежит немедленному уничтожению», 80 – «недостоверность сбой телеметрии», 100 – «источник телеметрия». Описание всех возможных кодов качества ТИ приведено в [17]. В дальнейшем все ТИ с кодами качества, отличными от 100, отфильтровываются. Критичными с точки зрения определения СХН являются дискретность по уровню и интервал регистрации DT. В приведенном примере интервал регистрации составляет 08–09 с. Дискретность по уровню оценивается на основе анализа графических зависимостей.

Таблица 4

Вид таблицы LIST

Begin	Duration	End	N	DT	MIN	MEAN	MAX	CODE
07.10.2018 23:59	167	14.10.2018 23:59	67728	0:00:08	63,3	75,5	82,1	8-6; 80-1; 100-67721
07.10.2018 23:59	168	14.10.2018 23:59	65059	0:00:09	16,1	20,0	22,1	8-6; 80-1; 100-65052
07.10.2018 23:59	167	14.10.2018 23:59	67909	0:00:08	63,8	75,2	82,6	8-6; 80-2; 100-67901

Анализ таблицы LIST и графиков зависимости от времени позволяет удостовериться в том, что ТИ всех режимных параметров по исследуемым присоединениям действительно поступают в ОИК, имеют достаточное качество, а их физические пределы соответствуют природе измеряемой величины.

Дискретность по уровню и интервал регистрации определяются настройками фильтрации ОИК и системы телемеханики, установленной на объекте. Наиболее частым случаем является применение апертуры в ОИК. Апертурой, или зоной нечувствительности, называется величина, определяющая минимальное изменение значения параметра, которое следует фиксировать в архивах телеметрической информации. Апертура настраивается с целью снижения номинальных расходов системных и транспортных ресурсов на хранение и передачу незначительных изменений параметра. Для увеличения точности определения СХН на время проведения активного эксперимента апертуру в ОИК следует отключить.

Дискретность по уровню не должна превышать по напряжению 0,2–0,5 %, по мощности 0,5–1 % [18]. Систематические погрешности измерительных приборов и класс точности измерительных трансформаторов тока и напряжения не оказывают существенного влияния на точность СХН, определяемой в относительных единицах.

Интервал регистрации должен быть меньше временного интервала, в течение которого напряжение в узле нагрузки при проведении активного эксперимента остается неизменным. В литературе приводятся различные требования к интервалу регистрации, но, основываясь на собственном практическом опыте, авторы считают, что его величина не должна превышать 1 мин. Корректно оценить интервал регистрации ТИ можно только тогда, когда шаг времени, заданный при выгрузке из ОИК, был равен нулю. В этом случае в массиве данных остаются только ТИ, действительно поступившие в ОИК. Если будет задан другой шаг времени, то недостающие значения дополняются за счет дублирования последнего поступившего значения, и оценить фактический интервал регистрации не представляется возможным.

На данном этапе необходимо определить направление перетоков мощности по исследуемым присоединениям. Поскольку задачей анализа ТИ является определение СХН, то знак активной мощности, протекающей от электрической сети к энергопринимающим установкам

потребителей, всегда принимается положительным. При отрицательных значениях необходимо применить инверсию, задав значение параметра $Ret = -1$ в таблице mainLIST. Направление реактивной мощности может отличаться от направления активной мощности, поэтому инверсии необходимо подвергать как переток активной мощности, так и переток реактивной мощности для каждого присоединения, по которому активная мощность имеет отрицательные значения.

Следует отметить, что при проведении активного эксперимента кольцевые связи должны быть разомкнуты, так как перетоки по замкнутым кольцевым связям определяются не только величиной исследуемой нагрузки, но и уравнивающим перетоком между частями энергосистемы, которые в процессе активного эксперимента могут меняться непредсказуемым образом.

4. Первичная обработка телеизмерений

После проведения активного эксперимента и выгрузки ТИ из ОИК наступает этап первичной обработки ТИ.

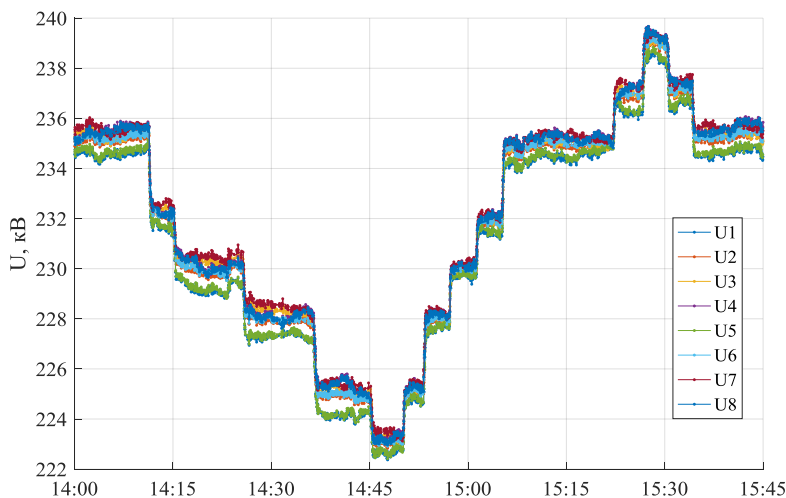


Рис. 1. Зависимости напряжений от времени $U(t)$

На этапе первичной обработки ТИ:

1. Производят фильтрацию всех ТИ с кодами качества, отличными от «0x100 Источник: телеметрия».
2. Из всего перечня выбирают только те ТИ, которые соответствуют исследуемым присоединениям, формируя таблицу LIST для периода активного эксперимента.

3. Корректируют знаки мощностей ТИ по принципу «к нагрузке» – «+», «от нагрузки» – «-». В результате все активные мощности будут иметь положительное направление.

4. Если телеизмерения получены из разных каналов ОИК, то проверяют одновременность их получения. Для этого строят зависимости напряжений от времени $U(t)$, например, как показано на рис. 1.

По рис. 1 видно, что изменения напряжения происходят синхронно. Зависимости напряжения от времени позволяют оценить длительность проведения активного эксперимента и диапазон, в котором изменялось напряжение.

5. Из всего массива данных выбирают ТИ, соответствующие периоду проведения эксперимента.

6. Окончательно принимают ТИ, которых за интервал времени проведения активного эксперимента поступило наибольшее количество, оставив для каждого исследуемого присоединения по три ТИ: U , P и Q .

7. Формируют таблицу Single (табл. 5), содержащую следующие переменные: nu , np , nq – номер ТИ напряжения, активной мощности и реактивной мощностей соответственно в векторе NOM (double), $tlim$ – временные границы рассматриваемого интервала (datetime), $Unom$ – номинальное напряжение, кВ (double), fil – признак необходимости применения фильтрации данных.

Таблица 5

Вид таблицы Single

Название строки	nu	np	nq	$tlim$		$Unom$	fil
Присоединение 1	83	20	49	20-Oct-2018 12:30:00	20-Oct-2018 13:30:00	220	0
Присоединение 2	71	11	40	20-Oct-2018 12:30:00	20-Oct-2018 13:30:00	110	1
Присоединение 3	79	10	39	20-Oct-2018 12:30:00	20-Oct-2018 13:30:00	10	0

Присоединения, по которым не поступали значения и/или поступали только нулевые значения, из дальнейшего рассмотрения исключают. Некоторые исследуемые присоединения могут быть нетелеизмеряемы, т.е. значения перетоков мощностей по ним не поступа-

ют в ОИК. Для таких присоединений могут быть использованы формулы дорасчёта, составляемые на основании баланса мощностей по сборным шинам. Применение дорасчётов для нетелеизмеряемых присоединений повышает эффективность использования результатов активного эксперимента.

Например, в случае отсутствия ТИ напряжения U и при наличии данных ТИ фазного тока I , активной P и реактивной Q мощностей на напряжение можно определить дорасчетом по выражению:

$$U_i = \frac{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}{\sqrt{3} \cdot I_i}, \quad (1)$$

где $i = 1 \dots N$ – номер отсчета.

Применение дорасчетов возможно только после приведения ТИ к общей оси времени согласно методике, описанной в подразделе 5.

5. Анализ ТИ

На этапе анализа ТИ строят и анализируют два вида графических зависимостей для каждого из исследуемых присоединений:

1. Зависимости напряжения, активной и реактивной мощностей от времени $U(t)$, $P(t)$, $Q(t)$. Пример такого графика приведен на рис. 2.

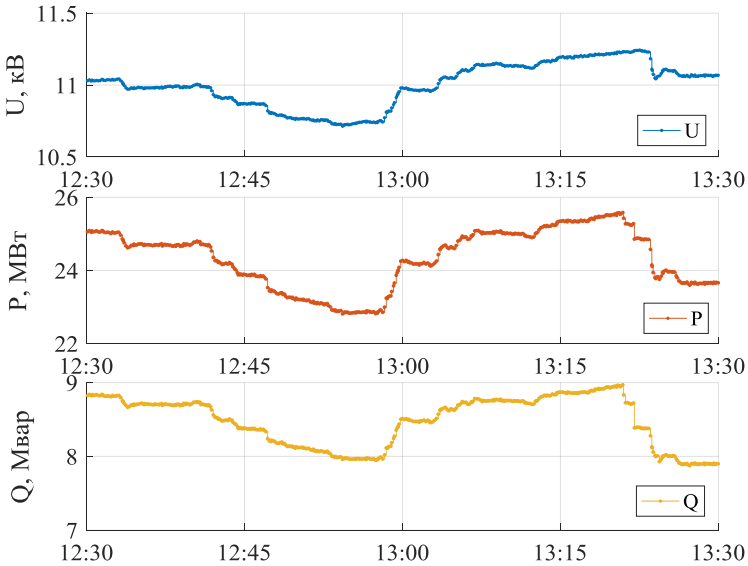


Рис. 2. Зависимости напряжения, активной и реактивной мощностей от времени

2. Зависимости активной и реактивной мощностей от напряжения $P(U)$ и $Q(U)$. Пример такого графика приведен на рис. 3.

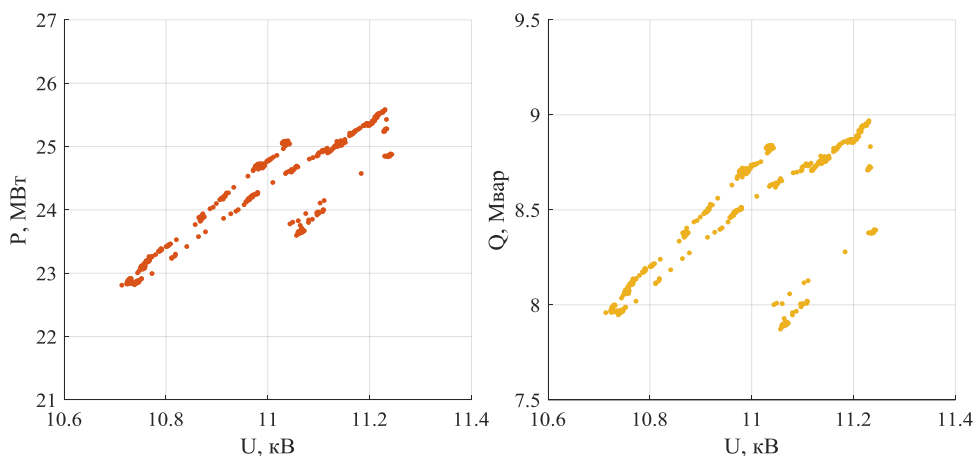


Рис. 3. Зависимости активной и реактивной мощностей нагрузки от напряжения

Для построения зависимостей $P(U)$ и $Q(U)$ необходимо, чтобы значения U и P , U и Q соответствовали одним и тем же моментам времени. Так как при получении ТИ из ОИК в качестве шага времени был задан нуль, то каждое из ТИ соответствует своему моменту времени. Причем для разных ТИ моменты времени не просто отличаются, но и неравномерны. Таким образом, стоит задача приведения нескольких ТИ, имеющих различные метки времени, к общей оси времени.

Общепринятым является подход, когда величина параметра для заданного момента времени принимается равной его последнему известному значению. Метод приведения массивов ТИ к общей оси времени работает следующим образом: метки времени одного из массивов принимаются в качестве общей оси времени, значения остальных ТИ в соответствующие моменты времени принимаются равными последним известным значениям. При этом ось времени продолжает оставаться неравномерной. Результат работы методики показан на рис. 4.

Здесь в качестве общей оси времени приняты метки времени активной мощности P , а значения напряжения U для них определены, исходя из описанного принципа. Возможны различные варианты формирования общей оси времени: по ТИ с наименьшим интервалом регистрации; по ТИ с наибольшим интервалом регистрации; по всем мет-

кам времени всех приводимых ТИ. Сопоставление вариантов на практике показало, что существенного влияния на конечный результат с точки зрения получения СХН выбор варианта не оказывает.

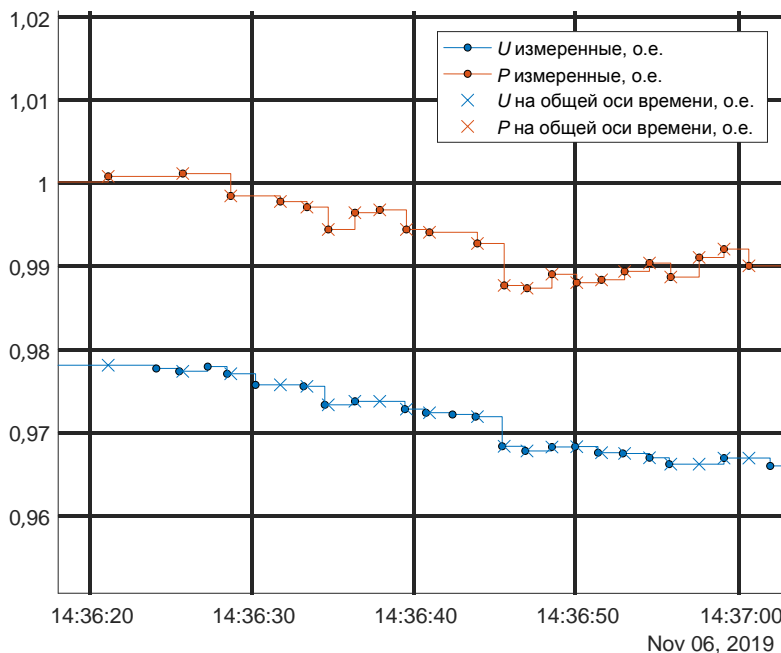


Рис. 4. Пример работы методики приведения к общей оси времени

При выгрузке ТИ из ОИК с шагом времени, отличным от нуля, процедура приведения ТИ к общей оси времени выполняется штатными средствами ОИК. При этом в качестве общей оси времени принимается равномерная ось с шагом, заданным пользователем. Такой подход для определения СХН неприемлем, так как имеет два существенных недостатка. Во-первых, в случае если заданный шаг превышает фактический интервал регистрации, часть данных теряется из-за прореживания; в случае если заданный шаг меньше фактического интервала регистрации, появляются «лишние» точки с повторяющимися значениями, не отражающие физику процесса. Во-вторых, теряется возможность определения фактического интервала регистрации ТИ, который, как было отмечено выше, необходим для оценки качества ТИ.

Авторами предлагается проводить анализ качества ТИ и построение зависимостей от времени по исходным ТИ, выгруженным из ОИК

с нулевым шагом по времени. Дальнейшие операции по дорасчету, построению зависимостей режимных параметров друг от друга, определению СХН осуществляются после приведения ТИ к общей оси времени с использованием описанного метода.

Далее для определения СХН необходимо выделить интервалы времени, когда включенный состав и режимы работы единичных электроприёмников близки [19, 20].

На основе анализа зависимостей от времени определяют интервалы времени, когда изменения мощности нагрузки происходят согласованно с изменениями напряжения. Пример результата такого анализа представлен на рис. 5.

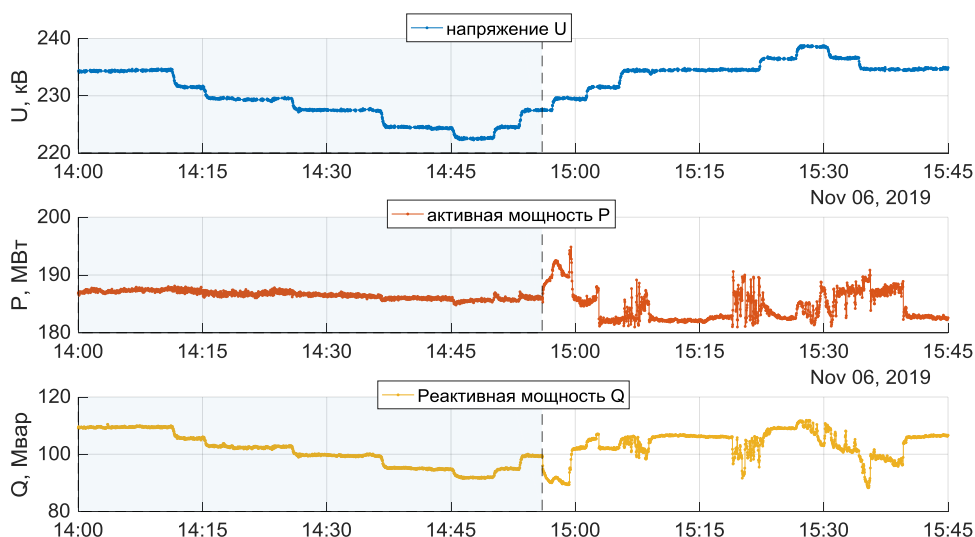


Рис. 5. Разделение данных по времени

На рис. 5 по графическим зависимостям $P(t)$ и $Q(t)$ видно, что в 14:55 происходит резкое изменение мощности нагрузки, не связанное с изменением напряжения. Кроме того, после 14:55 также наблюдаются колебания мощности нагрузки. На основании этого для определения СХН используют интервал времени 14:00 – 14:55, а остальные измерения исключают из дальнейшего рассмотрения. Для этого в таблице Single (см. табл. 5) для рассматриваемого присоединения соответствующим образом корректируют значение t_{lim} . Если для определения СХН выделяют несколько интервалов времени, в таблицу Single добавляется несколько строк для одного и того же присоединения с различными значениями t_{lim} .

При наличии систем автоматического регулирования поведение нагрузки может меняться при различных уровнях напряжения. Например, устройства компенсации реактивной мощности при заданных уровнях напряжения могут поддерживать постоянное значение коэффициента мощности, а при отклонении напряжения за заданные пределы – постоянное значение напряжения. Другим примером является регулирование тока электролиза с помощью дросселей намагничивания. В регулировочном диапазоне дросселей ток остается постоянным, и активная мощность не зависит от напряжения, а при выходе за пределы регулировочного диапазона зависимость начинает проявляться. Аналогичным образом проявляется регулирование за счет автоматического изменения положения ответвлений устройства регулирования напряжения трансформаторов. В этом случае данные ТИ следует разделить по значениям напряжения, используя анализ графической зависимости $P(U)$ или $Q(U)$. Пример такого случая показан на рис. 6.

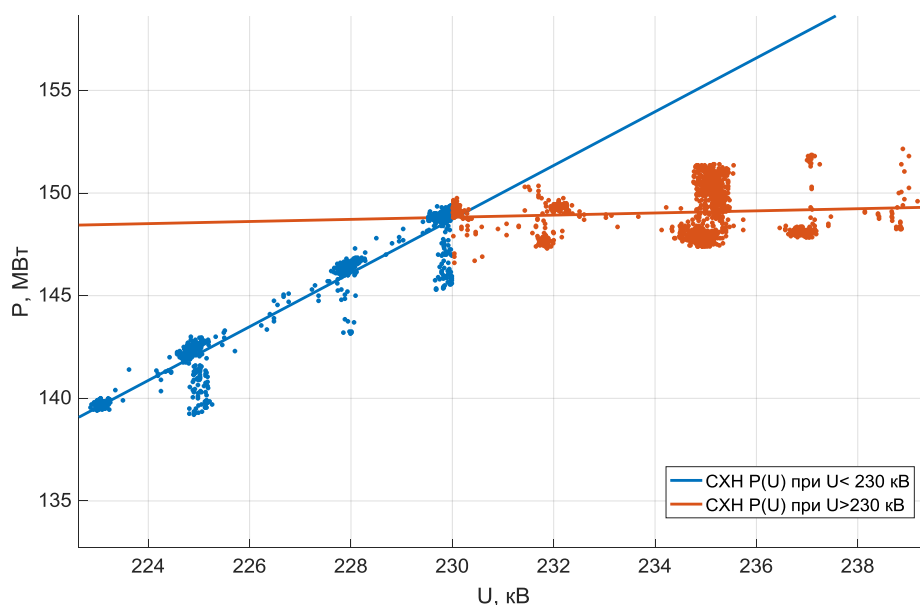


Рис. 6. Разделение данных по уровню напряжения

На рис. 6 при значениях напряжения выше 230 кВ проявляется действие автоматических регуляторов, за счет чего мощность нагрузки остается практически неизменной. При снижении напряжения ниже 230 кВ регулировочный диапазон исчерпан, и проявляется зависимость

активной мощности от напряжения. В этом случае данные ТИ до 230 кВ и выше 230 кВ следует рассматривать отдельно и определить СХН для каждого из диапазонов напряжения. Современные программные комплексы по расчёту установившихся режимов позволяют задавать различные СХН в зависимости от уровня напряжения.

6. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению

После предварительной обработки данных ТИ и их разделения на группы по интервалам времени или уровням напряжения осуществляют фильтрацию выбросов и определяют методом наименьших квадратов параболические или линейные СХН для каждой из групп [12, 13, 21, 22].

Для определения полиномиальной модели СХН составляют систему уравнений вида (2), например, для активной мощности:

$$\begin{pmatrix} P_{(1)} \\ P_{(2)} \\ \dots \\ P_{(N)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & U_{(1)} & U_{(1)}^2 \\ 1 & U_{(2)} & U_{(2)}^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & U_{(N)} & U_{(N)}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где N – количество измерений в рассматриваемой группе; A_0 [МВт], A_1 [МВт/кВ], A_2 [МВт/кВ²] – искомые коэффициенты СХН в именованных единицах.

Решают её, вводя обозначения:

$$X = \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} 1 & U_{(1)} & U_{(1)}^2 \\ 1 & U_{(2)} & U_{(2)}^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & U_{(N)} & U_{(N)}^2 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} P_{(1)} \\ P_{(2)} \\ \dots \\ P_{(N)} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Применяя критерий минимизации суммы квадратов разностей правой и левой частей уравнения системы

$$(AX - B)^T \cdot (AX - B) \rightarrow \min, \quad (4)$$

получают решение вида:

$$A^T A X = A^T B \Rightarrow X = (A^T A)^{-1} \cdot A^T B, \quad (5)$$

где A^T – транспонированная матрица коэффициентов СХН.

После определения коэффициентов СХН в именованных единицах получают зависимости мощностей от напряжения:

$$P(U) = A_0 + A_1U + A_2U^2, \quad (6)$$

переводят коэффициенты СХН в относительные единицы, приняв в качестве базисного напряжения $U_{\text{БАЗ}}$ значение номинального напряжения. Подставив $U_{\text{БАЗ}}$ в выражение (6), определяют значение базисной мощности $P_{\text{БАЗ}}$, тогда коэффициенты СХН по напряжению в относительных единицах для каждого интервала времени каждого присоединения:

$$a_0 = A_0 \frac{1}{P_{\text{БАЗ}}}; \quad a_1 = A_1 \frac{U_{\text{БАЗ}}}{P_{\text{БАЗ}}}; \quad a_2 = A_2 \frac{U_{\text{БАЗ}}^2}{P_{\text{БАЗ}}}. \quad (7)$$

В случае определения линейной модели СХН в выражении (2) коэффициент $A_2 = 0$, а алгоритм получения коэффициентов останется без изменений.

7. Сопоставление и обобщение результатов. Получение итоговых статических характеристик нагрузки по напряжению

На последнем этапе проводят анализ полученных СХН для выбранных интервалов. Анализ проводят путем графического сопоставления СХН между собой с учетом точек измерений, по которым они получены. Наиболее достоверны интервалы, когда напряжения изменяются в широком диапазоне, а значения мощности имеют наименьший разброс относительно СХН. Часть интервалов на этом этапе может отфильтровываться. СХН выбранных интервалов, имеющие близкий коэффициент наклона, группируются, а их коэффициенты усредняются. Пример графического сопоставления СХН, полученных для однотипной нагрузки, приведен на рис. 7.

На рис. 7 сплошными линиями показаны СХН, а точками – данные ТИ, по которым они получены. Если какая-то из характеристик заметно отличается от других, она подлежит исключению. Остальные СХН, полученные для однотипных нагрузок, усредняют. Для этого, используя значения базисных мощностей, полученных для каждого из присоединений, исходные массивы данных переводят в относительные единицы по формулам:

$$p_i = \frac{P_i}{P_{\text{БАЗ}}}; \quad u_i = \frac{U_i}{U_{\text{БАЗ}}}. \quad (8)$$

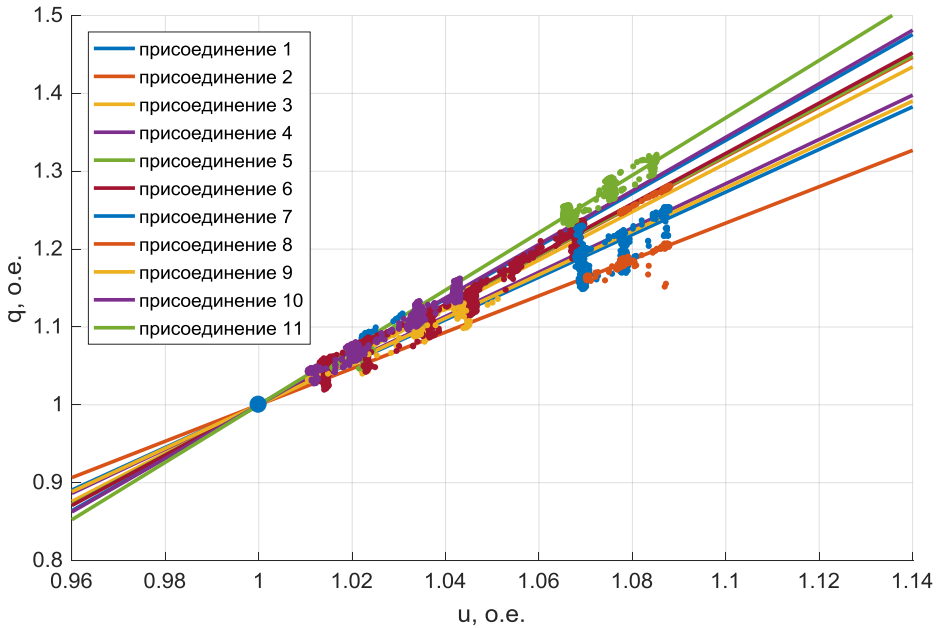


Рис. 7. Сопоставление СХН в относительных единицах

После чего для всех присоединений, питающих однотипную нагрузку, в относительных единицах записывается и решается общая переопределенная система уравнений вида:

$$\begin{pmatrix} p_{(1)} \\ p_{(2)} \\ \dots \\ p_{(N)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & u_{(1)} & u_{(1)}^2 \\ 1 & u_{(2)} & u_{(2)}^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & u_{(N)} & u_{(N)}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Система уравнений (9) решается с помощью метода наименьших квадратов аналогично решению системы (2).

При определении коэффициентов линейной модели СХН система уравнений примет вид:

$$\begin{pmatrix} p_{(1)} \\ p_{(2)} \\ \dots \\ p_{(N)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & u_{(1)} \\ 1 & u_{(2)} \\ \cdot & \cdot \\ 1 & u_{(N)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Полученные в результате решения систем уравнений (9) и (10) усреднённые коэффициенты СХН в относительных единицах используют при проведении расчётов установившихся режимов электроэнергетических систем.

Заключение

В статье обобщён практический опыт обработки телеизмерений, полученных из оперативно-информационного комплекса при проведении активного эксперимента, и предложена пошаговая методика выгрузки, оценки качества, обработки телеизмерений с целью определения статических характеристик нагрузки по напряжению:

1. Даны рекомендации: по выгрузке телеизмерений режимных параметров с учётом специфики объекта исследования, режима работы электрической сети и качества выгружаемых телеизмерений; по использованию настроек программного обеспечения «Анализ данных» и структуре хранения телеизмерений;

2. Определены параметры для оценки пригодности телеизмерений при определении статических характеристик нагрузки, позволяющие исследователю удостовериться в том, что все телеизмерения действительно поступают в оперативно-информационный комплекс и удовлетворяют требованиям качества. Важным является то, что на основе практического опыта установлены дискретность по уровню, не превышающая по напряжению 0,2–0,5 %, по мощности 0,5–1 % и предельный интервал регистрации телеизмерений, равный 1 минуте;

3. Для нетелеизмеряемых присоединений рекомендуется использовать формулы дорасчёта, что повышает эффективность использования результатов активного эксперимента;

4. Для анализа телеизмерений разработан метод приведения массивов телеизмерений к общей оси времени, при применении которого не происходит потери данных из-за прореживания; не появляются «лишние» точки с повторяющимися значениями, не отражающие физику процесса; сохраняется возможность определения фактического интервала регистрации телеизмерений;

5. При наличии систем автоматического регулирования, таких как устройства компенсации реактивной мощности, дроссели намагничивания, рекомендуется разделить телеизмерения по значениям напряжения, используя анализ зависимости $P(U)$ или $Q(U)$;

6. Ключевым моментом методики является получение усреднённых коэффициентов статических характеристик нагрузки в относительных единицах, которые и используют в расчётных моделях электроэнергетических систем;

7. Показано, каким образом можно автоматизировать процесс обработки телеизмерений с помощью написания пользовательских функций средствами MatLab, предложены табличные и графические формы отображения результатов.

Авторы надеются, что статья будет полезна для научных и инженерных работников, занимающихся определением статических характеристик нагрузки по напряжению.

Библиографический список

1. Кондрашов М.А., Попов М.Г. Профили информационного обмена для задачи идентификации статических характеристик нагрузки // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т.; Ставрополь, 15–17 сентября 2020 г. – Ставрополь: Изд-во Северо-Кавказ. федерал. ун-та, 2020. – С. 30–31.

2. Кондрашов М.А., Кондрашова А.Ю. Программное обеспечение для идентификации фактических статических характеристик нагрузки по напряжению крупных потребителей // Прикладная информатика. – 2018. – Т. 13. – № 5(77). – С. 44–50.

3. Нигаматуллин Р.М. Расчёт доли регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения на распределительной шине // Вестник Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 65–70. DOI: 10.18503/1995-2732-2020-28-4-65-70

4. Бончук И.А., Белей В.Ф. Анализ баланса мощности при изменении нагрузки в энергосистеме Калининградской области // Балтийский морской форум: материалы VII Междунар. Балтийск. морского форума: в 6 т.; Калининград, 07–12 октября 2019 г. – Калининград: Изд-во Балтийск. гос. акад. рыбопромысл. флота федерал. гос. бюджет. образоват. учрежд. высш. проф. образ. «Калининград. гос. техн. ун-т», 2019. – С. 754–761.

5. Кавалеров Б.В., Зиятдинов И.Р. Построение статических моделей синхронного генератора по экспериментальным данным // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 186–197. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.11

6. Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. ин-та управления – филиал Рос. акад. народ. хоз-ва и гос. службы при Президенте РФ, 2018. – 280 с.

7. Илюшин П.В. Особенности учета параметров нагрузки при анализе переходных процессов в сетях с объектами распределенной генерации // *Электроэнергия. Передача и распределение.* – 2018. – № 6 (51). – С. 54–60.

8. Газизова О.В., Нигаматуллин Р.М. Оценка влияния статических характеристик нагрузки на уровень частоты сети при раздельной работе с энергосистемой // *Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика.* – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 54–63. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/power.200406>

9. Мышлянников Д.А., Фишов А.Г. Идентификация статических характеристик узлов нагрузки электрической сети по напряжению в переходных процессах // *Электроэнергетика глазами молодежи – 2016: материалы VII Междунар. молодёж. науч.-техн. конф.: в 3 т.; Казань, 19–23 сентября 2016 г.* – Казань: Изд-во Казан. гос. энергетич. ун-та, 2016. – С. 331–334.

10. Тавлинцев А.С. Развитие методов идентификации статических характеристик комплексного узла нагрузки: специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2018. – 172 с.

11. Определение статических характеристик мощности нагрузок узлов сети на основе активного эксперимента / В.Ф. Кравченко, В.И. Нагай, И.Ф. Бураков, Б.П. Золоев // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* – 2015. – № 1(182). – С. 54–59. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-1-54-59

12. Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента / Ю.В. Хрущев, А.В. Панкратов, Н.Л. Бацева [и др.] // *Известия Томск. политехн. ун-та.* – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 164–175.

13. Research features of voltage static load characteristics in the electric system of Russia / A.V. Gudkov, D.N. Dadonov, E.A. Krotkov [et al.] // *Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions): 6th International Conference ICRITO.* – Noida, India: Excellent publishing house, 2017. – P. 295–300. DOI: 10.1109/ICRITO.2017.8342441

14. Дзюба М.А., Тарасенко В.В., Коржов А.В. Метод определения статических характеристик нагрузки по напряжению с учетом ограничений по режимным параметрам и электробезопасности активного эксперимента // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 28–35. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/power180204>

15. Об опыте определения статических характеристик нагрузки по напряжению на основании натурных испытаний / А.В. Гудков, Д.Н. Дадонов, Е.А. Кротков, К.С. Аверьянова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 6. – С. 105–109. DOI: [10.17213/0136-3360-2016-6-105-109](http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2016-6-105-109)

16. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 57114-2016 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электроэнергетические системы. Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике и оперативно-технологическое управление. Термины и определения» (утв. приказом Росстандарта от 04.10.2016 № 1302-ст) // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

17. Оперативно-информационный комплекс СК-2007. Т. 4. Руководство по настройке обработки и хранения данных. Версия 7.6 (ред. 31 от 22.12.2013) / ЗАО «Монитор Электрик», 2013. – 167 с.

18. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 246 с.

19. Тавлинцев А.С., Суворов А.А., Стаймова Е.Д. Поиск однотипных графиков нагрузки энергообъекта // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 20–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/power180203>

20. Тавлинцев А.С., Суворов А.А. Статистически равновесные состояния нагрузки в задаче идентификации статических характеристик нагрузки // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 23–28. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/power170203>

21. Панкратов А.В., Полищук В.И., Бацева Н.Л. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 11–20. DOI: [10.14529/power150102](http://dx.doi.org/10.14529/power150102)

22. Пат. № 2584338 С1 Рос. Федерация, МПК G01R 21/133. Способ определения статических характеристик нагрузки по напряжению: № 2015107215/28: заявл. 02.03.2015: опубл. 20.05.2016 / А.В. Панкратов, Н.Л. Бацева, В.И. Полищук; заяв. Нац. исслед. Томск. политехн. ун-т.

References

1. Kondrashov M.A., Popov M.G. Profili informatsionnogo obmena dlia zadachi identifikatsii staticheskikh kharakteristik nagruzki [Profiles of Data Exchange for the Task of Static Load Characteristics Identification]. *Elektroenergetika glazami molodezhi. Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii. Stavropol'*, 15-17 September 2020. Stavropol': Severo-Kavkazskii federal'nyi universitet, 2020, pp. 30-31.

2. Kondrashov M.A., Kondrashova A.Iu. Programmnoe obespechenie dlia identifikatsii fakticheskikh staticheskikh kharakteristik nagruzki po napriazheniiu krupnykh potrebitelei [Software to Identify the Actual Voltage Steady-state Load Characteristics Identification of Large Consumers]. *Prikladnaia informatika*, 2018, vol. 13, no. 5(77), pp. 44-50.

3. Nigmatullin R.M. Raschet doli reguliruiushchego effekta nagruzki v otklonenii napriazheniia na raspredelitel'noi shine [Calculation of a Share of the Load Regulating Effect in the Distribution Busbar Voltage Deviation]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 65-70. DOI: 10.18503/1995-2732-2020-28-4-65-70

4. Bonchuk I.A., Belei V.F. Analiz balansa moshchnosti pri izmenenii nagruzki v energosisteme Kaliningradskoi oblasti [Analyses of a Power Balance according to Load Variation in the Kaliningrad Oblast Energy System]. *Baltiiskii morskoi forum. Materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma, Kaliningrad*, 07-12 October 2019. Kaliningrad: Baltiiskaia gosudarstvennaia akademiia rybopromyslovogo flota federal'nogo gosudarstvennogo biudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniia vysshego professional'nogo obrazovaniia "Kaliningradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet", 2019, pp. 754-761.

5. Kavalero B.V., Ziiatdinov I.R. Postroenie staticheskikh modelei sinkhronnogo generatora po eksperimental'nym dannym [About Tasks to Research the Adaptive Power Station Operation Based on Converted Aircraft Gas Turbines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2020, no. 34, pp. 186-197. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.11

6. Gurevich Iu.E., Iliushin P.V. Osobennosti raschetov rezhimov v energoraionakh s raspredelennoi generatsiei [Special Considerations of Mode's Calculations in the Power Districts with Distributed Generation]. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii institut upravleniia - filial Rossiiskoi akademii narodnogo khoziaistva i gosudarstvennoi sluzhby pri Prezidente RF, 2018, 280 p.

7. Iliushin P.V. Osobennosti ucheta parametrov nagruzki pri analize perekhodnykh protsessov v setiakh s ob"ektami raspredelennoi generatsii [Taking into Account Special Considerations of Load Parameters when Analyzing Transient Processes in the Greed with Distributed Generation]. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie*, 2018, no. 6 (51), pp. 54-60.

8. Gazizova O.V., Nigamatullin R.M. Otsenka vliianiia staticheskikh kharakteristik nagruzki na uroven' chastoty seti pri razdel'noi rabote s energosistemoi [Evaluation of the effect of static load characteristics on the level of frequency during separate operations with the grid]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 54-63. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/power.200406>

9. Myshliannikov D.A., Fishov A.G. Identifikatsiia staticheskikh kharakteristik uzlov nagruzki elektricheskoi seti po napriazheniiu v perekhodnykh protsessakh [Static Characteristics Identification of Voltage for Electrical Greed Load Nodes in Transient Processes]. *Elektroenergetika glazami molodezhi - 2016. Materialy VII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Kazan'*, 19-23 September 2016. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2016, pp. 331-334.

10. Tavlintsev A.S. Razvitie metodov identifikatsii staticheskikh kharakteristik kompleksnogo uzla nagruzki: spetsial'nost' 05.14.02 "Elektricheskie stantsii i elektroenergeticheskie sistemy" [Development of the Methods of Static Characteristics Identification for a Complex Load Node: specialty 05.14.02 "Power plants and power systems"]. Ph. D. thesis. Ekaterinburg, 2018, 172 p.

11. Kravchenko V.F., Nagai V.I., Burakov I.F., Zoloev B.P. Opredelenie staticheskikh kharakteristik moshchnosti nagruzok uzlov seti na osnove aktivnogo eksperimenta [Determination of Static Characteristics of Power Loads of Network Nodes Based on the Active Experiment]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 1(182), pp. 54-59. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-1-54-59

12. Khrushchev Iu.V., Pankratov A.V., Batseva N.L. et al. Metodika identifikatsii staticheskikh kharakteristik nagruzki po rezul'tatam aktivnogo

eksperimenta [Methodological Aspects of Static Load Model Derivation Based on Experimental Data]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 164-175.

13. Gudkov A.V., Dadonov D.N., Krotkov E.A. et al. Research features of voltage static load characteristics in the electric system of Russia. *Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions): 6th International Conference ICRITO*. Noida, India: Excellent publishing house, 2017, pp. 295-300. DOI: 10.1109/ICRITO.2017.8342441

14. Dziuba M.A., Tarasenko V.V., Korzhov A.V. Metod opredeleniia staticheskikh kharakteristik nagruzki po napriazheniiu s uchetom ogranichenii po rezhimnym parametram i elektrobezopasnosti aktivnogo eksperimenta. [Method for Determining of Voltage Steady-State Load Characteristics with Subject to the Limitation on Sensitive Parameters and Electrical Safety of Active Experiment]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 28-35. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/power180204>

15. Gudkov A.V., Dadonov D.N., Krotkov E.A., Aver'ianova K.S. Ob opyte opredeleniia staticheskikh kharakteristik nagruzki po napriazheniiu na osnovanii naturnykh ispytaniy [About the Experience Determine the Static Characteristics of the Load Voltage on the Basis of Field Tests]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2016, no. 6, pp. 105-109. DOI: 10.17213/0136-3360-2016-6-105-109

16. Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii GOST R 57114-2016 "Edinaia energeticheskaia sistema i izolirovanno rabotaiushchie energosistemy. Elektroenergeticheskie sistemy. Operativno-dispetcherskoe upravlenie v elektroenergetike i operativno-tekhnologicheskoe upravlenie. Terminy i opredeleniia" (utv. prikazom Rosstandarta ot 04.10.2016 № 1302-st) [National standard of the Russian Federation GOST R 57114-2016 "United Power System and Isolated Power Systems. Electric Power Systems. Operational Dispatching Control in Power Industry and Operational Technological Control. Terms and Definitions" (approved by order of Rosstandart dated 04.10.2016 No. 1302-st)]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

17. Operativno-informatsionnyi kompleks SK-2007. Tom 4. Rukovodstvo po nastroiike obrabotki i khraneniia dannykh. Versiia 7.6 (red. 31 ot 22.12.2013) [Operative-information Complex SK-2007. Volume 4. Configuration Manual of Data Processing and Storage. Version 7.6 (rev. 31 of 12/22/2013)]. ZAO "Monitor Elektrik", 2013, 167 p.

18. Gurevich Iu.E., Libova L.E. *Primenenie matematicheskikh modelei elektricheskoi nagruzki v raschetakh ustoichivosti energosistem i nadezhnosti elektrosnabzheniia promyshlennykh potrebitelei* [An Application of Power Loads Mathematical Models in Calculations of Power System Stability and Power Supplying Reliability of Industrial Consumers]. Moscow: ELEKS-KM, 2008, 246 p.

19. Tavlintsev A.S., Suvorov A.A., Staimova E.D. *Poisk odnotipnykh grafikov nagruzki energoob"ekta* [Searching for Typical Load Schedule of a Power Facility]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 20-27. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/power180203>

20. Tavlintsev A.S., Suvorov A.A. *Statisticheski ravnovesnye sostoianiia nagruzki v zadache identifikatsii staticheskikh kharakteristik nagruzki* [Statistically Equilibrium States of Load in the Problem of Static Load Characteristics Identification]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 23-28. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/power170203>

21. Pankratov A.V., Polishchuk V.I., Batseva N.L. *Eksperimental'noe opredelenie staticheskikh kharakteristik nagruzki elektroenergeticheskikh sistem* [Measurement-Based Approach for Identification of Static Load Models of Electric Power Systems]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 11-20. DOI: [10.14529/power150102](http://dx.doi.org/10.14529/power150102)

22. Pankratov A.V., Batseva N.L., Polishchuk V.I. *Sposob opredeleniia staticheskikh kharakteristik nagruzki po napriazheniiu* [Technique of Static Load-voltage Characteristics]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2584338 C1 (2016).

Сведения об авторах

Панкратов Алексей Владимирович (Томск, Россия) – кандидат технических наук, директор Представительства АО «СО ЕЭС» в Томской области (634041, Томск, пр. Кирова, 36, e-mail: PankratovAV@kuzb.so-ups.ru).

Бацева Наталья Ленмировна (Томск, Россия) – кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: batsevan@tpu.ru).

Жуйков Александр Константинович (Томск, Россия) – аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: zhuykov_aleksandr@mail.ru).

Шувалова Алёна Александровна (Барнаул, Россия) – аспирантка Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (656038, Алтайский край, Барнаул, пр. Ленина, 46, e-mail: alena_shuvalova_360@mail.ru).

Кондрашов Михаил Анатольевич (Санкт-Петербург, Россия) – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: kondrashov.ma@edu.spbstu.ru).

About the authors

Aleksey V. Pankratov (Tomsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Head of Representative Office of Stock company “System Operator of the Unified Power System” in Tomsk (634041, Tomsk, 36, Kirova ave., e-mail: PankratovAV@kuzb.so-ups.ru).

Natalia L. Batseva (Tomsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of Power Engineering Department National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, 30, Lenina ave., e-mail: batsevan@tpu.ru).

Alexander K. Zhuykov (Tomsk, Russian Federation) – Graduate Student of Power Engineering Department National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, 30, Lenina ave., e-mail: zhuykov_aleksandr@mail.ru).

Alena A. Shuvalova (Barnaul, Russian Federation) – Graduate Student of Power Engineering Faculty, Polzunov Altai State Technical University (656038, Altai Krai, Barnaul, 46, Lenina ave., e-mail: alena_shuvalova_360@mail.ru).

Mikhail A. Kondrashov (Sankt-Petersburg, Russian Federation) – Graduate Student of Power Engineering Institute Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (195251, Saint Petersburg, 29, Polytechnicheskaya str., e-mail: kondrashov.ma@edu.spbstu.ru).

Получено 30.08.2021