

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-116-128>

УДК 631.371:620.9

Обеспечение надежности и эффективности электроэнергетики сельскохозяйственной отрасли Республики Беларусь в современных условиях

И. В. Протосовицкий¹⁾, Е. П. Забелло¹⁾, М. А. Прищепов¹⁾, В. А. Дайнеко¹⁾

¹⁾Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Обоснована необходимость совершенствования системы электроснабжения в сельскохозяйственной отрасли в связи с ростом доли нагрузок первой категории, требующих обеспечения адресной надежности. Совершенствование технико-экономических показателей централизованной генерации энергии, ее передачи по магистральным и распределительным сетям не может обеспечить высокую надежность потребителей первой категории, число которых в сельском хозяйстве постоянно растет. Отмечено, что если в энергосистеме при аварийном отключении генерирующего источника высокой мощности обеспечивается питание путем ввода аварийного резерва, то при аварийном отключении участка питающей сети электропитание может отсутствовать длительное время (до нескольких часов) у потребителей, запитанных по схемам как радиальной, так и закольцованной распределительной сети. Рассмотрены пути и способы совершенствования системы электроснабжения, такие как интеграция единой энергосистемы с источниками распределенной генерации, обеспечение их параллельной работы, управление нагрузками с применением сложных тарифов на электрическую энергию, учитывающих форму графиков нагрузки, модернизация технологических процессов с учетом их автоматизации и повышения технико-экономических показателей. Принимая во внимание увеличение объемов электропотребления для нужд отопления и горячего водоснабжения, рассмотрен вариант ликвидации перекрестного субсидирования, при котором повышается интерес потребителей к экономии электроэнергии и снижению платы за электропотребление путем изменения режимов работы оборудования и приборов. Анализ перспективных мероприятий по энергосбережению в агроэнергетике показал, что к режимным мероприятиям добавляются другие, обусловленные тем, что за последние десятилетия в энергетике сельского хозяйства существенно продвинулись в своем развитии силовая электроника и микропроцессорная техника, например для частотного управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором с высокими энергетическими и динамическими показателями. Поскольку в сельском хозяйстве существует ряд технологий, где электрическая энергия используется без применения установок электропривода и в каждом из технологических процессов имеются свои требования к надежности и качеству электрической энергии, рассмотрена схема взаимного резервиро-

Адрес для переписки

Забелло Евгений Петрович
Белорусский государственный аграрный
технический университет
просп. Независимости, 99
220023, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 377-63-42
kafeshp@tut.by

Address for correspondence

Zabello Evgenii P.
Belarusian State Agrarian
Technical University
99, Nezavisimosty Ave.,
220023, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 377-63-42
kafeshp@tut.by

вания от смежных подстанций с использованием источников распределенной генерации и технических средств автоматизированного энергоучета, контроля и управления электрическими нагрузками.

Ключевые слова: агроэнергетика, распределенная генерация, многоуровневый энергоучет, сложные тарифные системы, режимы работы, энергоэффективность

Для цитирования: Обеспечение надежности и эффективности электроэнергетики сельскохозяйственной отрасли Республики Беларусь в современных условиях / И. В. Протосовицкий [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 116–128. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-116-128>

Ensuring the Reliability and Efficiency of the Power Industry in the Agricultural Sector of the Republic of Belarus in Modern Conditions

I. V. Protosovitskii¹⁾, E. P. Zabello¹⁾, M. A. Prishchepov¹⁾, V. A. Daineko¹⁾

¹⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The necessity of improving the power supply system in the agricultural sector is substantiated by the growing share of first-category loads that require targeted reliability. Improving values of the technical and economic indicators of centralized energy generation and its transmission through main and distribution grids cannot ensure high reliability of consumers of the first category, the number of which is constantly growing in agriculture. It is noted that if the power system in outage of the generating source of the high power supply is provided by inputting the emergency reserve, then at emergency switching-off phase of the section of the mains, power supply of the consumers powered by the schemes for both radial and looped distribution network may be absent for a long period of time (several hours). The ways and methods of improving the power supply system, such as integration of a single power system with distributed generation sources, ensuring their parallel operation, load management using complex tariffs for electric energy that take into account the form of load schedules, modernization of technological processes taking into account their automation and improvement of technical and economic indicators, are considered. Taking into account the increase in electricity consumption for heating and hot water supply, we consider the option of eliminating cross-subsidization, which stimulates the interest of consumers in saving electricity and reducing the fee for electricity consumption by changing the operating modes of equipment and devices. The analysis of promising energy-saving measures in agricultural power engineering demonstrated that routine measures are being supplemented by other measures induced by the fact that power electronics and microprocessor technology have significantly advanced in their development in the agricultural energy sector over the past decades, for example, for frequency control of asynchronous motors equipped by a short-circuited rotor that has high values of energy and dynamic indicators. Since there are a number of technologies in agriculture where electric energy is used without the electric drive units application and each of the technological processes has its own requirements for the reliability and quality of electric energy, the scheme of mutual redundancy from adjacent substations using distributed generation sources and technical means of automated energy accounting, control and management of electrical loads, is considered.

Keywords: agricultural power engineering, distributed generation, multi-level energy accounting, complex tariff systems, operating modes, energy efficiency

For citation: Protosovitskii I. V., Zabello E. P., Prishchepov M. A., Daineko V. A. (2020) Ensuring the Reliability and Efficiency of the Power Industry in the Agricultural Sector of the Republic of Belarus in Modern Conditions. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2), 116–128. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-116-128> (in Russian)

Введение

Динамика роста электрических нагрузок в сельскохозяйственной отрасли и увеличение доли нагрузок первой категории потребовали совершенствования подходов при создании всей цепи электроснабжения – от генерации, передачи и распределения энергии до ее потребления. На первом уровне все большую долю стали занимать источники распределенной генерации (РГ) – ветряные и солнечные электростанции, накопители энергии, биогазовые установки, как правило, малой и средней мощности, что потребовало проведения специальных исследований по обеспечению интеграции источников РГ в энергосистему. На этапе распределения энергии появилась необходимость реконструкции электрических сетей напряжением 10 кВ с учетом их кольцевания, секционирования и совершенствования релейных защит и в целом автоматизации сетей с точки зрения включения на параллельную работу с энергосистемой источников РГ. В области потребления энергии совершенствование связано с ростом разнообразия видов потребителей, их единичной и суммарной мощности, степени автоматизации и регулировочных возможностей в условиях переменных электрических нагрузок. Решение перечисленных задач должно быть комплексным, хотя оно касается различных государственных и частных поставщиков и потребителей, цели которых не совпадают, и исключается возможность разработки целевых функций, сводимых в единую систему для принятия оптимальных решений.

Централизованная генерация энергии

Учитывая предстоящий ввод в эксплуатацию двух блоков Белорусской АЭС, существенный рост суммарной электрической мощности энергоисточников в энергосистеме требует более широкого использования электрической энергии во всех технологических процессах, в том числе и в сельском хозяйстве, а также частичной замены вида энергии в ряде процессов, основываясь на динамике изменения удельных расходов топлива на выработку и передачу электрической и тепловой энергии. Динамика обосновывается совершенствованием как источников электрической и тепловой энергии, так и сокращением расходов на ее транспорт и применение.

Динамика изменения удельных расходов условного топлива на производство электрической ($b_{уд}$, кг/(кВт·ч)) и тепловой ($d_{уд}$, кг/Гкал) энергии в Минэнерго за 2012–2017 гг., по данным [1], приведена в табл. 1.

Как следует из приведенных в табл. 1 показателей, имеет место существенное снижение значений $b_{уд}$ (на 9,7 %) и незначительное $d_{уд}$ (на 0,7 %) на временном отрезке в шесть лет. Подобная динамика свидетельствует о том, что темп снижения удельных расходов на производство электроэнергии более чем в 10 раз выше темпа снижения удельных расходов топлива на производство тепловой энергии; в связи с чем применение электрической энергии взамен тепловой в процессах ее потребления становится более выгодным. Добавим к этому еще и то, что на рассматриваемом от-

резке времени технологический расход энергии на ее транспорт в электрических сетях уменьшился с 9,91 до 8,85 %, т. е. на 11,90 %, а в тепловых сетях – с 9,55 до 9,21 % (только на 3,70 %) [1].

Таблица 1

**Динамика удельных расходов условного топлива
на производство электрической и тепловой энергии и их соотношение**

**Movement of the specific consumption of conventional fuel
for the production of electric and thermal energy and their ratio**

Год	$b_{уд}$, кг/(кВт·ч)	$d_{уд}$, кг/Гкал	$\frac{b_{уд}}{d_{уд}}$, кВт·ч/Гкал
2012	0,2546	167,82	654,52
2013	0,2561	167,57	654,31
2014	0,2468	167,55	678,90
2015	0,2355	167,52	710,10
2016	0,2304	167,06	725,09
2017	0,2321	166,63	717,92

Однако совершенствование технико-экономических показателей централизованной генерации энергии, ее передачи по магистральным и распределительным сетям не может обеспечить высокую надежность потребителей первой категории, число которых в сельском хозяйстве постоянно растет. Если в энергосистеме при аварийном отключении генерирующего источника высокой мощности обеспечивается питание путем ввода аварийного резерва, то при аварийном отключении участка питающей сети электропитание может отсутствовать длительное время (до нескольких часов) у потребителей, запитанных по схемам как радиальной, так и замкнутой распределительной сети. Подобная ситуация имеет место во всех странах – даже с высокой технологией производства и потребления энергии. Поэтому современная энергетика развивается в так называемом формате 4Д [2]:

- Д1 – декарбонизация – ускоренное снижение зависимости от углеводородных топлив, использование местных ресурсов, отходов и возобновляемых источников энергии (ВИЭ);
- Д2 – децентрализация – внедрение распределенных систем энергоснабжения на базе электростанций малой мощности по технологиям когенерации и тригенерации, с использованием местных топлив и ВИЭ;
- Д3 – диверсификация – многообразие энергетических схем, видов используемых топлив, инвестиционных бизнес-моделей, инструментов взаимодействия производителей энергии и бытовых структур;
- Д4 – дигитализация, Интернет вещей, цифровые технологии в энергетике.

Перечисленные составляющие формата 4Д частично учтены при разработке ТКП 609–2017 «Автоматизация распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ», устанавливающего общие требования

к компонентам комплекса автоматизированной системы управления распределительными электрическими сетями напряжением 0,4–10 кВ. Так, в п. 5.3 документа указано, что к первостепенным задачам автоматизации распределительных электрических сетей относятся следующие:

- увеличение оперативности переключений в сетях путем установки новых или замены физически изношенных и морально устаревших коммутационных аппаратов в ТП, РП, КТП, установки реклоузеров и (или) управляемых выключателей нагрузки, разъединителей на линиях электропередачи;
- автоматическое управление переключениями при аварийном отключении элементов электрической сети 10 кВ;
- обеспечение расширенных функций мониторинга и диагностики текущего состояния применяемого электрооборудования;
- изменение схем построения распределительной электрической сети при ее реконструкции и автоматизации;
- оптимизация режима работы электрической сети за счет наличия в ней дистанционно управляемых элементов с использованием динамической модели сети и телеметрической информации с объектов автоматизации;
- повышение пропускной способности распределительных электрических сетей и снижение потерь электроэнергии [3, 4];
- создание сетевой технологической структуры, способствующей эффективности функционирования рынка энергии.

Электроснабжение потребителей аграрного сектора

Электроснабжение потребителей аграрного сектора в настоящее время осуществляется в основном по распределительным сетям напряжением 10 и 0,4 кВ. Централизованное электроснабжение с наличием генерирующих источников большой единичной мощности (300, 400, 1200 мВт) и линий электропередачи напряжением 750, 330 кВ и менее, как уже отмечалось, хотя и гарантирует высокие значения показателей надежности в целом по зонам электроснабжения, однако обеспечение адресной надежности при подобном способе электроснабжения исключено. По этой причине в Республике Беларусь уже действуют более 400 блок-станций на различных предприятиях, в системе ЖКХ, у частных инвесторов, в том числе и на балансе ГПО «Белэнерго». Дальнейшее усиление децентрализации электроснабжения в настоящее время практически заморожено в связи с подготовкой к вводу АЭС. Это нерациональный подход, поскольку проблема состоит не только в поиске новых потребителей энергии, но и в покрытии переменных нагрузок на различных интервалах – суточных, недельных и сезонных, так как плотность графиков нагрузок и коэффициент их неравномерности в динамике за последние 15 лет практически не изменились [5]. Заметим, что при неровных графиках нагрузок имеет место снижение надежности электроснабжения, поскольку увеличивается число

пусков-остановов как основного генерирующего оборудования, так и резервных источников и источников РГ.

Проблема выравнивания электрических нагрузок может быть успешно решена при наличии возможности их переноса из пиковых в непиковые зоны, глубокой автоматизации производства (непрерывные технологические процессы) и применении источников генерации в виде накопителей энергии. Следует отметить, что в республике проведение подобных мероприятий не имеет системного характера, а в сельском хозяйстве особо не практикуется, так как полагается, что при невысокой доле электропотребления в отрасли по отношению к суммарному по всем отраслям ожидаемые результаты будут незначительными. Это привело к тому, что электрическая энергия поставляется потребителям сельхозсектора в основном по одноставочному тарифу, и по этой причине современные технические средства энергоучета, контроля и управления нагрузками оказываются невостребованными, что приводит не к получению экономического эффекта от выполнения названных процедур, а к нанесению дополнительного ущерба, поскольку современные многофункциональные технические средства автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии дорогостоящи, как и вся электроника вообще. Однако в последнее время совершенствованию тарифов на электрическую энергию, в том числе и в коммунально-бытовом секторе, стало уделяться больше внимания, о чем свидетельствует постановление Совета Министров Республики Беларусь [6], согласно которому введена трехзонная дифференциация тарифов на электрическую энергию, потребляемую населением для бытовых целей. Выполним сравнительный анализ платы за электропотребление некоторым бытовым потребителем при использовании трехзонного тарифа и действующего одноставочного (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение платы за электропотребление по трехзонному и одноставочному тарифам с суточным графиком нагрузок, приведенным на рис. 1 (кривая 1), и по ровному графику

Comparison of electricity charges for three-zone and one-rate tariffs with the daily load schedule as shown on Fig. 1 (curve 1) and for an even schedule

Вид тарифа	Тариф, руб./(кВт·ч)			Объем электропотребления, кВт·ч/сут			Суммарная плата за сутки $P_{сут}$, руб.
	Ночной T_n	Полупиковый $T_{пп}$	Пиковый T_p	W_n	$W_{пп}$	W_p	
Трехзонный	0,0890	0,1039	0,2671	60,0	148,50	102,0	48,01
Одноставочный	0,1484	0,1484	0,1484	60,0	148,50	102,0	46,08
Трехзонный при работе по ровному графику нагрузок	0,0890	0,1039	0,2671	90,5	142,23	77,6	43,55

В табл. 2 приведены исходные данные по тарифам ночной (с 23:00 до 6:00), полупиковой (с 6:00 до 17:00), пиковой зон (с 17:00 до 23:00) и одноставочному тарифу. Объемы электропотребления рассчитаны по зо-

нам в двух вариантах: в соответствии с приведенным на рис. 1 реальным графиком нагрузок (ГН) для многоквартирного дома и ровным графиком при том же объеме электропотребления. Расчет суммарной платы за суточный объем электропотребления $\Pi_{\text{сут}}$ выполнен по следующим формулам:

– по трехзонному тарифу

$$\Pi_{\text{сут.т}} = T_{\text{н}}W_{\text{н}} + T_{\text{пп}}W_{\text{пп}} + T_{\text{п}}W_{\text{п}}; \quad (1)$$

– по одноставочному тарифу

$$\Pi_{\text{сут.о}} = T_{\text{о}}(W_{\text{н}} + W_{\text{пп}} + W_{\text{п}}); \quad (2)$$

– по трехзонному тарифу при ровном графике нагрузок (ГН)

$$\Pi_{\text{сут.тр}} = T_{\text{н}}W_{\text{нр}} + T_{\text{пп}}W_{\text{ппр}} + T_{\text{п}}W_{\text{пр}}. \quad (3)$$

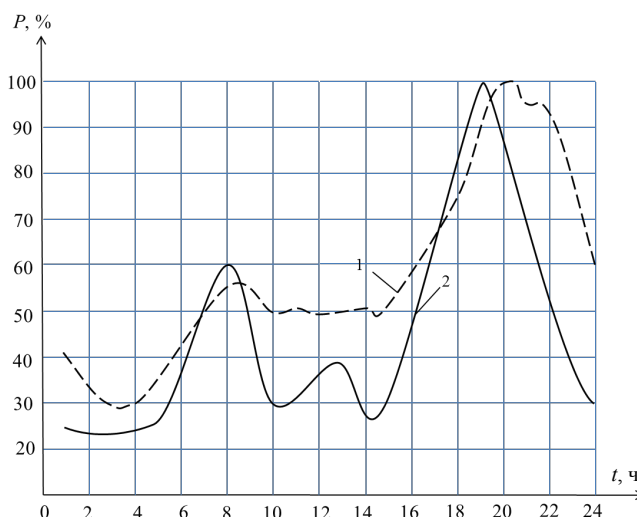


Рис. 1. Суточные графики нагрузок жилого многоквартирного (1) и сельского жилого (2) домов в зимний период

Fig. 1. The daily schedules of loads of residential multi-apartment (1) and rural residential (2) houses during the winter period

В (3) значения W рассчитаны исходя из того, что средняя нагрузка \bar{P} при ровном ГН определена по формуле

$$\bar{P} = \frac{W_{\text{н}} + W_{\text{пп}} + W_{\text{п}}}{24}. \quad (4)$$

В связи с чем:

$$W_{\text{нр}} = \bar{P}t_{\text{н}}; \quad W_{\text{ппр}} = \bar{P}t_{\text{пп}}; \quad W_{\text{пр}} = \bar{P}t_{\text{п}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{н}}$, $t_{\text{пп}}$, $t_{\text{п}}$ – длительность зон (соответственно 7, 11 и 6 ч).

Согласно данным последней колонки табл. 2, наименьшее значение платы за электрическую энергию приходится при электропотреблении по ровному ГН, а разница платы по одноставочному и трехзонному тарифам незначительна – 4,2 %. То есть использование предложенного варианта тарифа на электроэнергию в коммунально-бытовом секторе в подобном виде и принятых соотношений ставок по зонам является недостаточно эффективным стимулом для переноса электрических нагрузок потребителями данного сектора из зон пиковых нагрузок в зоны полупиковых и ночных нагрузок.

Суточные графики электрических нагрузок в современных жилых домах

Для сравнения суточных графиков нагрузок современного жилого и сельского домов (данные за 2000 г. [7]) на рис. 1 приведены кривые, свидетельствующие о том, что в обоих случаях ГН различаются незначительно в период пиковых нагрузок энергосистемы (с 18:00 до 22:00) и ночные часы (с 23:00 до 7:00), причем коэффициент неравномерности, определяемый отношением минимальной и максимальной нагрузок, равен 0,29. Учитывая, что формирование ГН в коммунально-бытовом секторе как в городах, так и в сельской местности обусловлено в основном биологическими циклами и сменностью работы, без источников распределенной генерации проблема выравнивания графиков, подобных приведенным на рис. 1, практически неразрешима. Данное обстоятельство усугубляется еще и тем, что в республике проводятся экспериментальные исследования по вводу в эксплуатацию жилых домов, в которых для нужд отопления, горячего водоснабжения, приготовления пищи используется только электроэнергия в дополнение к уже традиционным видам ее применения. Так, в [8] представлены информация по восьмиквартирному дому (табл. 3) и результаты расчетов объемов электропотребления W_{Σ} за январь – март и удельного значения $W_{\Sigma\text{уд}}$ на одну квартиру, плата за электропотребление по одноставочному и трехзонному тарифам при допущении, что суточный график нагрузок соответствует приведенному на рис. 1 для многоквартирного жилого дома. Расчет показал, что для обоих вариантов тарифов месячная плата за электропотребление составляет более 100 руб., если не использовать льготный тариф на электроэнергию, как это делается при централизованном теплоснабжении в настоящее время.

Таблица 3

Объемы электропотребления в полностью электрифицированном жилом доме и плата по двум видам тарифов

The volumes of power consumption in the fully electrified residential building and the payment for two types of tariffs

Месяц	W_{Σ} , кВт·ч	$W_{\text{уд}}$, кВт·ч/квартиру	Плата по тарифу, руб./мес.	
			одноставочному	трехзонному
Январь	7140	759,3	112,7	117,2
Февраль	6347	707,6	105,0	109,2
Март	6178	694,8	103,1	107,2

В связи с этим проведем дополнительные расчеты, используя соотношение удельных расходов топлива на производство электро- и теплоэнергии (табл. 1), тарифы на оба вида энергии (T_e и T_t) и допущение, что до перевода дома полностью на электропотребление его удельная величина в расчете на квартиру составляла $W' = 100$ кВт·ч/мес. Учитывая это и приведенные в табл. 1 значения соотношений удельных расходов условного топлива на производство электрической и тепловой энергии в пределах $K_{уд} = 650\text{--}700$ кВт·ч/Гкал (примем в среднем $K_{уд} = 675$ кВт·ч/Гкал), получим следующую формулу для расчета платы за теплопотребление по действующей системе в соответствии с тарифом на тепловую энергию для нужд отопления и горячего водоснабжения ($T_t = 18,48$ руб./Гкал с июня по декабрь):

$$\Pi = \frac{W_{уд} - W'}{K_{уд}} T_t = \frac{\Delta W T_t}{K_{уд}}, \quad (6)$$

где ΔW – дополнительный объем электропотребления.

Согласно (6), плата составит величины, приведенные в табл. 4. Видно, что в случае применения только электрической энергии эта сумма увеличивается в 5,4 раза в связи с тем, что плата за тепловую энергию в настоящее время в коммунально-бытовом секторе существенно дотируется.

Таблица 4

Плата за дополнительный объем электропотребления и ее соотношение с оплатой по действующему тарифу на отпуск тепловой энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения
The fee for additional power consumption and its ratio with the payment at the current tariff for the release of heating and hot water supply

Месяц	ΔW , кВт·ч/квартиру	Плата Π_2 за ΔW , руб./квартиру	Плата Π_1 по тарифу на тепловую энергию T_t , руб./квартиру	$\frac{\Pi_2}{\Pi_1}$
Январь	659,3	97,80	18,05	5,41
Февраль	607,6	90,17	16,63	5,42
Март	594,8	88,30	16,28	5,42

Результаты расчетов, приведенные в табл. 4, свидетельствуют о том, что переход на электрификацию жилых домов в полном объеме требует ликвидации перекрестного субсидирования, по крайней мере в данном случае, хотя уже неоднократно отмечалось и в печати, и в ряде документов Минэнерго, что эта мера назрела давно во всех отраслях энергетики и ее реализацию нужно ускорять повсеместно. О возможностях и сложности подобной работы говорилось в [9], где рассмотрены экономические стимулы совершенствования систем энергообеспечения и энергопотребления в коммунально-бытовом секторе.

В отличие от варианта повышения платы за электропотребление в условиях роста его объема, рассмотренного в данной статье, в [9] полага-

лось, что он, наоборот, будет снижаться за счет регулировочных и энерго-сберегающих мероприятий путем стимулирования потребителя. Подобное стимулирование (повышение зарплаты и снижение налоговой ставки) тем более рационально при существенном росте электрических нагрузок. В противном случае широкого применения метод полной электрификации жилых домов, рассмотренный в [8], не получит. Правда, временное решение затронутой проблемы найдено в [6], так как согласно п. 4 раздела «Тарифы на электроэнергию для населения» записано: «Электрическая энергия для нужд отопления и горячего водоснабжения в жилых домах (квартирах), не оборудованных в установленном порядке системами централизованного тепло- и газоснабжения, при наличии отдельного (дополнительного) прибора индивидуального учета электрической энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения оплачивается по тарифу, равному 0,0335 руб./кВт·ч». Таким образом, если считать, что действующий одноставочный тариф в размере 0,1484 руб./кВт·ч в коммунально-бытовом секторе признан в Минэнерго оптимальным (т. е. не дотируемым), то введение нового тарифа на электроэнергию для названной выше категории жилых домов (по величине в $0,1484 : 0,0335 = 4,42$ раза меньше действующего), хотя и обеспечит снижение платы за электропотребление, но в то же время исключит стимулы для ее экономии. Это имеет место уже и сейчас при централизованном теплоснабжении, когда потребители оплачивают только порядка 20 % стоимости подаваемой с горячей водой теплоты.

Перспективы энергосбережения в агроэнергетике

Уплотнение графиков нагрузок, аналогичных приведенным на рис. 1, и в целом графиков электрических нагрузок в технологических процессах сельскохозяйственной отрасли с применением сложных тарифов позволяет повысить технико-экономические показатели генерации и передачи энергии и снизить плату за электропотребление, т. е. обе режимно взаимодействующие стороны получают определенный положительный результат. К этому результату добавляется и другой, обусловленный тем, что за последние десятилетия в энергетике сельского хозяйства существенно продвинулись в своем развитии силовая электроника и микропроцессорная техника, на основе которых разработаны статические преобразователи частоты, обеспечивающие частотное управление асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором с высокими энергетическими и динамическими показателями. Так как электроприводами потребляется более 60 % электроэнергии, из которых 90 % относится к асинхронному электроприводу, то в условиях дефицита энергоресурсов это делает особо острой проблему энергосбережения. Современный электропривод в сельском хозяйстве развивается по направлениям:

- наибольшего приближения электродвигателя с приводным валом или совмещения с рабочей машиной;
- организации регулирования параметров (скорости, момента, угла поворота и т. д.), что расширяет его функциональные возможности и повышает энергоэффективность технологических процессов;

– повышения экономичности электропривода;
– совершенствования процессов автоматизации, информатизации и контроля технического состояния.

В сельском хозяйстве применяется также ряд таких технологий, где электрическая энергия используется без применения установок электропривода, например облучение животных, подогрев воды и корма, сушка продукции, освещение и т. д. В каждом из этих процессов имеются свои требования к качеству электрической энергии, обеспечить которое невозможно при широком использовании ВИЭ и их незначительной единичной мощности. Хотя некоторые авторы, например [10], полагают, что ВИЭ можно использовать без отдачи энергии в централизованную сеть, так как альтернативная энергия эффективна (рентабельна) только в тех случаях, когда она потребляется энергоемкими технологиями. Изложенное в [10] мнение сомнительно, поскольку последовательная и целесообразная реализация мероприятий в рассмотренном выше формате 4Д, касающихся распределительных сетей, привела к совершенствованию схем электрообеспечения потребителей, представленных на рис. 2. Здесь взаимное резервирование питания от смежных подстанций (ПС № 1, ПС № 2) с напряжением 35 кВ и выше дополнено питанием от источников распределенной генерации (РГ-1–РГ-3), секционированием участков линий с помощью реклоузеров РК-1–РК-4 и установкой средств защиты, автоматики и энергоучета в реальном времени с тем, чтобы реализовать в том числе и функции контроля нагрузок, оценки показателей качества электрической энергии и косвенного управления нагрузками с применением электронных счетчиков Wh .

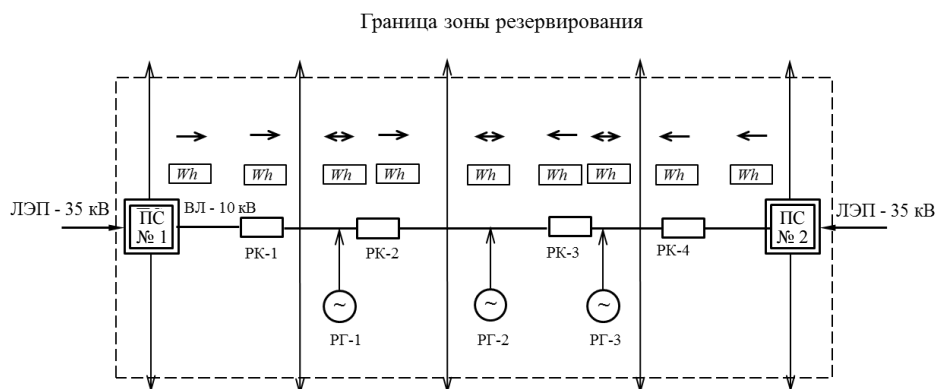


Рис. 2. Схема взаимного резервирования от смежных подстанций с использованием реклоузеров на магистральной линии, источников распределенной генерации и технических средств автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии

Fig. 2. The scheme of mutual reservation from adjacent substations using reclosers on the main line, distributed generation sources and technical means of an automated power control and accounting system

Для построения сети, аналогично приведенной на рис. 2, необходимы существенные финансовые средства, учитывая к тому же, что сельские распределительные сети в основном исчерпали срок службы. По этой причине следует иметь в виду, что задачи интеллектуализации контроля и управления электрическими нагрузками аграрных потребителей совместно

с комплексом других перечисленных выше задач решаются в условиях глубокой модернизации этих сетей с привлечением в том числе и новых источников распределенной генерации с целью повышения надежности электроснабжения потребителей всех категорий и групп.

ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения адресной надежности потребителей электрической энергии в сельском хозяйстве необходимо пересмотреть соотношение ее объемов в пользу распределенной генерации с учетом того, что каждый потребитель первой категории должен быть обеспечен собственными энергоисточниками в виде энергетической триады [11, 12], в состав которой обязательно включается накопитель энергии соответствующей мощности, учитывая неравномерность суточного графика работы модуля ФЭС.

2. Совершенствованию тарифных систем в электроэнергетике должна сопутствовать ликвидация перекрестного субсидирования, учитывая, что при ее наличии все выпадающие доходы (ущербы) энергосистемы покрываются за счет снижения рентабельности предприятий, вынужденных увеличивать в этом случае цены на продукцию.

3. Сельское хозяйство республики имеет достаточно широкую возможность роста объемов электропотребления за счет внедрения электронагрева, вентиляции, сушки, регулируемого электропривода в различных технологических процессах. В то же время совершенствование этих процессов обеспечивает возможность экономии энергии, что приводит к повышению энергоэффективности и снижению себестоимости продукции.

4. Для обеспечения высоких требований по уровню надежности электроснабжения потребителей электроэнергии в области сельского хозяйства централизованное электроснабжение должно дополняться источниками распределенной генерации, работающими параллельно с основными, учитывая как режимные условия (переменные графики генерации источников распределенной генерации), так и возможности обеспечения требуемых параметров энергии и прежде всего ее качества, соответствующего действующему стандарту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Республиканское унитарное предприятие электроэнергетики «ОДУ». 30 лет. Минск, 2018. 16 с.
2. Филиппович, А. Г. Распределенная генерация как механизм балансирования и резервирования мощностей белорусской энергосистемы / А. Г. Филиппович // Энергоэффективность. 2018. № 11. С. 17–21.
3. Козловская, В. Б. Несимметричные режимы работы линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 232–246. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246>.
4. Фурсанов, М. И. Расчет технологического расхода (потерь) электроэнергии в современных распределительных электрических сетях 0,38–10 кВ / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой, В. В. Макаревич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 408–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-408-422>.
5. Забелло, Е. П. К вопросу об интеграции объектов распределенной генерации в энергосистему / Е. П. Забелло // Энергетическая стратегия. 2019. № 3. С. 23–27.

6. Тарифы на электрическую и тепловую энергию для населения: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30.12.2013 № 166 (в редакции постановления Совета Министров Республики Беларусь от 01.07.2019).
7. Будзко, И. А. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Т. Б. Лещинская, В. И. Сукманов. М.: Колос, 2000. 536 с.
8. Сверчкова, Ж. В. Первый на Витебщине полностью электрифицированный дом / Ж. В. Сверчкова, Л. Е. Стульбо // Энергоэффективность. 2019. № 6. С. 24.
9. Забелло, Е. П. Экономические стимулы совершенствования систем энергообеспечения и энергопотребления в коммунально-бытовом секторе / Е. П. Забелло // Энергетика и ТЭК. 2017. № 3. С. 12–16.
10. Бринь, А. Возобновляемые источники энергии в отечественном аграрном производстве / А. Бринь, А. Косько, А. Синенький // Наука и инновации. 2019. № 2. С. 33–36.
11. Забелло, Е. П. Перспективы энергетической триады / Е. П. Забелло // Энергетика и ТЭК. 2016. № 9. С. 44–48.
12. Забелло, Е. П. Косвенное управление электрическими нагрузками в условиях развития распределенной генерации энергии / Е. П. Забелло, А. С. Качалко // Энергетическая стратегия. 2019. № 2. С. 23–27.

Поступила 17.09.2019 Подписана в печать 30.12.2019 Опубликована онлайн 31.03.2020

REFERENCES

1. *Republican Unitary Enterprise of Electric Power Industry "ODU". 30 Years*. Minsk, 2018. 16 (in Russian).
2. Filippovich A. G. (2018) Distributed Generation as a Mechanism for Balancing and Reserving Capacities of the Belarusian Power System. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (11), 17–21 (in Russian).
3. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2019) Asymmetrical Modes of Outdoor Lighting Lines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 232–246 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246>.
4. Fursanov M. I., Zalotoy A. A., Makarevich V. V. (2018) Calculation of Technological Consumption (Loss) of Electricity in Modern 0.38–10 kV Electrical Distribution Networks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 408–422 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-408-422>.
5. Zabello E. P. (2019) Towards the Issue of Integration of Distributed Generation Facilities in the Power System. *Energeticheskaya Strategiya [Power Engineering Strategy]*, (3), 23–27 (in Russian).
6. *Tariffs for Electric and Thermal Energy for the Population: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 30.12.2013 No 166 (as Amended by the Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 01.07.2019)*. Available at: https://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=64853 (in Russian).
7. Budzko I. A., Leshchinskaya T. B., Sukmanov V. I. (2000) *Electricity Supply for Agriculture*. Moscow, Kolos Publ. 536 (in Russian).
8. Sverchkova Zh. V., Stul'bo L. E. (2019) The First Fully Electrified House in Vitebsk Region Was Presented to the Conference Participants. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (6), 24. (in Russian).
9. Zabello E. P. (2017) Economic Incentives for Improving Energy Supply Systems and Energy Consumption in the Public Sector. *Energetika i TEK [Power Engineering and Fuel and Energy Complex]*, (3), 12–16 (in Russian).
10. Brin' A., Kos'ko A., Sinen'kii A. (2019) Renewable Energy Sources in Domestic Agricultural Production. *Nauka i Innovatsii = Science and Innovations*, (2), 33–36 (in Russian).
11. Zabello E. P. (2016) Prospects for the Energy Triad. *Energetika i TEK [Power Engineering and Fuel and Energy Complex]*, (3), 44–48 (in Russian).
12. Zabello E. P., Kachalko A. S. (2019) Indirect Control of Electrical Loads in Conditions of Development of Distributed Energy Generation. *Energeticheskaya Strategiya [Power Engineering Strategy]*, (2), 23–27 (in Russian).

Received: 17 September 2019 Accepted: 30 December 2019 Published online: 31 March 2020